



# ハイブリッド型高靱性セメント系複合材料の開発とその構造的利用に関する研究

(研究課題番号 12555157)

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B) (1))  
研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 三橋 博三

(東北大学大学院工学研究科教授)

# ハイブリッド型高靱性セメント系複合材料の開発とその構造的利用に関する研究

(研究課題番号 12555157)

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (1))  
研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 三橋 博三

(東北大学大学院工学研究科教授)



## 研究組織

研究代表者：三橋 博三（東北大学大学院工学研究科教授）  
研究分担者：大塚 浩司（東北学院大学工学部教授）  
金子 佳生（東北大学大学院工学研究科助教授）  
桐越 一紀（東北大学工学部教務職員）  
福山 洋（独立行政法人建築研究所上席研究員／研究主幹）  
石原誠一郎（（株）浅沼組技術研究所主任）  
研究協力者：川又 篤（東北大学大学院工学研究科博士課程後期）  
清田 雅量（東北大学大学院工学研究科博士課程前期）  
和地 正浩（東北大学大学院工学研究科博士課程前期）  
鈴木 里美（東北大学大学院工学研究科博士課程前期）

## 研究経費

平成 12 年度	8,900 千円
平成 13 年度	2,100 千円
平成 14 年度	2,300 千円
計	13,300 千円

## 研究発表

- 1) 和地正浩、三橋博三、金子佳生、川又篤：ハイブリット型繊維補強セメント系複合材料におけるコード繊維の付着特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.229-234、2001
- 2) 川又篤、三橋博三、金子佳生、福山洋：ハイブリット型繊維補強セメント系複合材料の靱性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.235-240、2001
- 3) A. Kawamata, H. Mihashi, Y. Kaneko and H. Fukuyama : Ductility of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites, Transaction of The Japan Concrete Institute, Vol.23, pp.201-206, 2001
- 4) H. Mihashi, A. Kawamata, Y. Kaneko and H. Fukuyama : Development of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites, Proc. of fib Congress 2002, S7-5-2, 2002
- 5) A. Kawamata, H. Mihashi and H. Fukuyama : Material Design of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites, Proc. of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, pp.85-94, 2002
- 6) K. Otsuka, H. Mihashi, M. Kiyota and S. Mori : Observation of Multiple Cracking on Micro and Meso Level, Proc. of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, pp.189-198, 2002
- 7) H. Mihashi, A. Kawamata and H. Fukuyama : Multiscale Approach for Development of High Performance Cementitious Composite Materials, Proc. of The Second International Science Forum at Honjo Campus, Akita Prefectural University, pp.11-18, 2002
- 8) 鈴木里美、三橋博三、川又篤：X線透過撮影による繊維補強セメント系複合材料のせん断ひび割れの検出、2003年度大会（東海）学術講演梗概集、（投稿中）、2003

# 目 次

## 序章 研究の背景と目的

## 第I部 ハイブリッド型セメント系複合材料の開発に関する基礎的検討

### 第1章 序

### 第2章 ひび割れ抵抗機構の特徴

### 第3章 材料構成要素の影響

### 第4章 結び

## 第II部 鉄筋コンクリート部材要素のひび割れ進展挙動と力学的特性に関する実験的検討

### 第5章 序

### 第6章 異形鉄筋周りのひび割れ進展挙動と付着特性 (Part I : 高靱性複合材料)

### 第7章 異形鉄筋周りのひび割れ進展挙動と付着特性 (Part II : ハイブリッド型複合材料)

### 第8章 せん断加力を受ける梁のひび割れ挙動と変形特性

### 第9章 結び

## 第III部 ハイブリッド型セメント系複合材料を用いた新しい構造システムの開発に関する検討

### 第10章 序

### 第11章 エネルギー吸収部材の数値解析的検討

### 第12章 エネルギー吸収部材の構造実験

### 第13章 実験結果の数値解析的評価及び応用展開

### 第14章 結び

## 第15章 結論

<謝辞>

# 序章

---

## 序章 研究の背景と目的

コンクリート材料は、建築材料として最も広く用いられている材料の一つであるが、ひび割れ抵抗性能で劣り、靱性に乏しい特徴がある。近年、耐震安全性のみならず、高耐久性の観点からも、ひび割れ抵抗性能に優れた高靱性材料が求められるようになり、各種繊維による複合化が試みられている。また、高強度コンクリートの開発も目覚ましい成果を収めている。しかし、高強度化に伴ってより脆性的な破壊性状を示し、靱性付与の方法開発が求められている。

短繊維補強セメント系複合材料の微細構造は、セメント系マトリックス（剛性、細孔率、欠陥密度及び欠陥分布、破壊特性）、繊維（剛性、強度、長さ、径、形状、束の大きさ）、並びに界面（付着特性、スナッピング係数）に関連する測定可能なパラメータによって特徴づけられる。これらのパラメータは、セメント種、混和材、骨材、繊維種及び含有率といった構成材料と加工処理法によって影響される。従って、新しい建築材料の開発は、影響因子があまりにも多いために中々実現できない。事実、次々と優れた性能を有する新素材繊維が開発されているにも拘わらず、短繊維補強セメント系複合材料としてその性能が十分に利用された例は極めて少ない。

本研究の目的は、マイクロメカニックスを考慮して作製する高靱性セメント系複合材料を構造部材の高靱性化に結びつけることを研究しようとするものである。マイクロメカニックスは、材料構造と複合特性の間に重要な結合を与える手法である。この結合は、変形の微細なメカニズムの重要な特徴を考慮しながら、巨視的な挙動に及ぼす材料構造の影響の定量化を表わす。その意味でマイクロメカニックスは、与えられた材料構造に対して、複合材料の特性を予測する可能性を創り出すと共に複合材料の微細構造の最適化への道筋を与えるものである。

本研究では、特に、既往の研究成果を一步進めて、鋼繊維の表面処理によって付着性能を上げると共に、マトリックスには変形能に優れた新素材繊維セメント複合体を用いることにより、高性能・高靱性セメント系複合材料を実現しようとするところに特徴がある。また本研究の重要課題の1つは、異形鉄筋周りの付着ひび割れやせん断ひび割れの制御により、より靱性に優れた鉄筋コンクリート部材を多段階ハイブリッド型複合化により実現するところにある。更に、この新たな特性付与を有効に生かした新しい構造システムの開発を検討する。

マイクロメカニックス手法の導入と材料の多段階ハイブリッド型複合化により、構造材料として求められる必要な靱性性能をより合理的に満たす材料の実現が可能となる。また、従来の多くの研究における短繊維補強セメント系複合材料の開発は、主として内外装仕上げ材として用いることを目的としてきた。それに対して本研究では、このような高靱性セメント系複合材料を用いたコンクリート構造部材の開発と、それをより有効に生かすことのできる新しい構造システムの開発を検討するところに特徴がある。また、このようなハイブリッド型複合化により、単なる鋼材の塑性変形のみによるエネルギー吸収機構よりも部材の座屈や変形の局所化を抑えると共に耐腐食性など耐久性上の性能向上もはかることができるものと期待される。

## 第I部

# ハイブリッド型セメント系複合材料の 開発に関する基礎的検討

---

## 第1章 序

コンクリート材料は高い圧縮強度を得ることができ、型枠によって自由な形状を形成することができることから、土木・建築構造物の代表的な構成材料の一つとなっている。また、一般に、経済性・耐久性・耐火性に於いても優位にあることから、より高い性能、施工の合理化を目指して更なる技術開発が行われている。しかしながら近年は、耐震安全性のみならず耐久性の面からも、ひび割れ抵抗性能の高いコンクリートが求められている。

コンクリートの引張強度は低く、更に歪み限度も小さいため、長期的観点からすると耐久性・安全性を損なうひび割れが発生しやすい脆性的な材料である。その弱点を補って、コンクリート材料を変形能力に富んだ高靱性材料に変える方法の一つに、セメント系材料を繊維によって補強する繊維補強セメント系複合材料（Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下、FRCCと記述する）が挙げられる。

FRCCは、これまでも様々な形で開発研究がなされてきたが、現在は主として非構造部材に使用されている。この背景として、繊維の使用によるコストの上昇、そして繊維を混入することによるワーカビリティの悪化が挙げられる。しかしながら、構造物への様々な要求性能を適切に充足するためには、性能に基づく設計システムの導入と新しい構造・材料技術の開発が不可欠となる。FRCCの利用は、従来の鉄筋コンクリート構造物に対してより高い性能や新たな種類の価値を付加できる可能性を有しており、これが社会の要求性能と合致すれば性能設計における有用な一つの技術となる。そのためには、性能設計における要求性能の充足をいかに評価するかが大切である。すなわち構成材料の特性からどのようにして構造要素や構造システムの性能を評価するかということになる。このような構成レベルの異なる物を考えるとき、巨視的な挙動をマクロレベル、微視的な挙動をミクロレベル、そしてその中間の挙動をメゾレベルとして、それらの「構成レベル」をレベル分けをすることが有効とされている。

以上のような背景から、第Ⅰ部では、「ひび割れのレベル」と「構成レベル」に着目し、異なる「構成レベル」を考慮に入れつつ基礎的検討を行う。即ち、多段階補強型セメント系複合材料の構成レベルの第一段階として、ミクロレベルのひび割れを補強する短くて極めて細い合成繊維を使用し、第二段階として、合成繊維でも補強しきれないメゾレベルのひび割れを補強する特殊加工された鋼繊維（スチールコード）を使用する。スチールコードは合成繊維と比較して剛性と強度が高く、形状も長くて径も太いものとなっている。スチールコードによる補強に関しては、スチールコード一本の引き抜き試験を行って微視的観点から検討を行うと共に、スチールコードと合成繊維の両方を使用した材料についてパラメトリックに調合を変化させて実験を行い、その性能を検討する。



## 第2章 ひび割れ抵抗機構の特徴

### 2.1 はじめに

近年目覚ましい発展をとげつつある高靱性FRCCは、多数のひび割れを生じることで金属に匹敵する靱性を発揮することができる。通常のFRCCに荷重が作用すると単独のひび割れが拡大し破壊に至るが、高靱性FRCCの場合はひび割れ間に介在する繊維が力を伝達することで荷重に抵抗し、また別の場所にひび割れが発生する。そしてこのプロセスは、引張応力場全面にわたって平行に近いひび割れが形成されるまで繰り返される。このようにして広範囲に微細なひび割れが生じ、あたかも鋼材で降伏領域が広がっていくように損傷が拡大し、高い靱性能を示すことにつながる。

Liらは、高靱性FRCCを創り出すためには、繊維とマトリックスの付着が良く、且つアスペクト比の大きい（細長い）繊維を用いることが有効としている。しかしながら、アスペクト比の大きい合成繊維では、繊維の曲げ剛性が小さいなどの理由から、一般に練り混ぜ、施工性は通常のモルタルに比べても大きく低下し、配筋が施されている構造物への打設は困難と言われている。又、このような長い繊維は、付着力が過剰に高くなり破断する傾向が強い。このような性状を改善する一つの方法として、太径で曲げ剛性が高く、且つ付着性能が高い繊維を用いることが考えられる<sup>1)</sup>。

このような背景から、本研究では太径繊維を用いたFRCCにおける靱性向上の可能性を検討した。本章で使用した太径繊維はスチールコードと呼ばれる特殊加工された鋼繊維である。スチールコードは、5本の鋼繊維を撚り合わせるにより太径化されており、且つ撚られることにより繊維表面に凹凸が生じるため引き抜け抵抗性能の向上にも期待が持てる。又、その形状及び曲げ剛性から、練り混ぜ・施工性にも有効と考えられる。つまり、スチールコードは高強度・高靱性挙動を示すFRCCの作製を可能にする繊維であると考えられる。

そこで本章では、スチールコードによる補強について引き抜け抵抗性能からハイブリッド型繊維補強に至るまでの基礎的な実験的検討を行った。

### 2.2 スチールコードの引き抜け抵抗性能に関する検討

#### 2.2.1 概要

本節では、スチールコードの使用にあたり、まずその引き抜け抵抗性能を確認するため、スチールコード一本をセメント試験体中央部に真直に埋め込んだひょうたん型試験体（図2.2.1）を用いて、引き抜き試験を行った。スチールコードでは表面に凹凸があり、その凹凸による引っ掛かりによって主に抵抗するため、合成繊維などで検討されている化学付着や摩擦付着とは機構が異なる。そこでここでは敢えて引き抜け抵抗性能と呼ぶこととする。FRCCにおいて高靱性挙動を得るには、繊維は破断せずに高い抵抗力を保持しつつ引き抜けることが望ましい。ここではパラメータとして、スチールコードのカット長さを3種類用意し、マトリックスの調合を2種類用意した。又、マトリックスの力学的特性を把握するため、プレーンマトリックスの各種試験も行った。

#### 2.2.2 実験方法

##### 2.2.2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表2.2.1に、スチールコードの詳細を表2.2.2に示す。ここで、スチールコード

表2.2.1 使用材料

	略号	比重	備考	製造元及び製品名
セメント	C	3.14	平均粒径：13 $\mu\text{m}$	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	平均粒径：0.15 $\mu\text{m}$	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ
硅砂微粉末	Si	2.60	平均粒径：1.5 $\mu\text{m}$	共立窯業原料社製 SNOW MARK SP-3
高性能AE減水剤	SP	1.1	主成分：芳香族アミノスルホン 酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリックFP200U

表2.2.2 スチールコードの詳細

カット長さ (mm)	コード径 ( $\mu\text{m}$ )	切断荷重 (N)	比重
16.21	380	230.5	7.84
32.02	380		
48.17	382		

表2.2.3 粉体の構成比

系列	略号	Vol.% of solid part		
		C	Si	SF
C-SF系	2c	0.793	0.000	0.207
C-Si-SF系	3c	0.700	0.150	0.150

は直径0.15mmの鋼繊維を5本集束して、ピッチ4.6mmで撚られることにより製造されている。又、カット長さは約16、32、48mmの3種類を用意した。

#### 2.2.2.2 調合

試験体作製方法は、型枠にスチールコードを予め配置し、そこにブレンマトリックスを流し込むという方法をとったため、スチールコードは直接混入されていないことを注意されたい。マトリックスにおける粉体の構成比を表2.2.3に示す。ここで調合2cはセメントとシリカフュームを用いて、調合3cはセメント、シリカフューム及び硅砂微粉末を用いて充填理論により構成されている。又、何れにおいても、水結合材比は40%とし、減水剤量は結合材重量の2.0%とした。粉体の構成比により2シリーズ、カット長さにより3シリーズ、合計6シリーズについてスチールコードの引き抜き試験を行った。

#### 2.2.2.3 練り混ぜ及び試験体作製方法

練り混ぜには真空オムニミキサー（最大容量10ℓ：千代田技研工業社製）を使用した。練り混ぜでは、まず粉体を投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し更に3分間練り混ぜた。

練り混ぜた後は、図2.2.2に示すような予めセッティングされたひょうたん型型枠、及び40×40×160mmの角柱試験体にブレンマトリックスを流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないように振動を与え、成形した。空気に解放した上面は、硬化途中に金こてで表面仕上げ（キャッピング）を施した。又、何れにおいても各シリーズ3体ずつ試験体を作製した。

#### 2.2.2.4 養生方法

試験体は打ち込み後、養生室内（20℃、相対湿度90%以上）にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に各種試験を行った。又、試験前日に試験体の寸法及び重量の測定、並びに角柱試験体においては切り欠き設置を行った。

#### 2.2.2.5 試験方法

##### (1) 動弾性係数の算出

JIS A 1127に準じ、40×40×160mmの角柱試験体を用い、一次共鳴振動数を測定し、動弾性係数を算出した。

##### (2) 切り欠き梁による3点曲げ試験

曲げ試験には、40×40×160mmの角柱試験体を使用した。

曲げ試験では、角柱試験体中央部に深さ20mmの切り欠きをコンクリートカッターにて設置したものを各シリーズ3体ずつ用いて、インストロン製万能試験機（最大能力2tf）により、変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行い、得られた最大曲げ荷重より、限界歪みエネルギー解放率  $G_{IC}$  を算出した。

##### (3) 圧縮試験

圧縮試験は、JIS A 1108に準じ、曲げ試験後の角柱試験体の片側を使用し、万能試験機（最大能力30tf）を用い、載荷速度約3kgf/cm<sup>2</sup>/secで行った。

##### (4) 引き抜き試験

引き抜き試験ではひょうたん型試験体を用いた。試験体作製の概略は図2.2.2の通りである。JCI-SF8<sup>2)</sup>に示される方法で、インストロン製万能試験機により変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行った（図2.2.3）。試験体はセパレータにより二つのブロックで構成されており、引張試験を行うことによりセパレータの部分が開く仕組みになっている。試験体両面にはクリップゲージを取り付け荷重に伴うセパレータ部分の開口変位を測定し、その平均値を開口変位として用いた。

### 2.2.3 実験結果及び考察

#### 2.2.3.1 プレーンマトリックスの物性

プレーンマトリックス角柱試験体を用いた試験で得られた結果を表2.2.4に示す。これを見ると、動弾性係数及び圧縮強度共に調合2cの方が調合3cより高い値を示しているため、セメントとシリカフュームにより構成された調合2cの方が強度・剛性に優れていることがわかる。これは第3章において確認した結果と同様の傾向となった。一般に、FRCCのマトリックスにおいては  $G_{IC}$  は小さい方が靱性に富んだ破壊挙動を示すと言われているが、最適な  $G_{IC}$  は繊維の種類や形状により異なると推測できる。そのためスチールコードにはどの程度の  $G_{IC}$  が適しているか、どの程度の  $G_{IC}$  であればスチールコードが高い抵抗力を保持しつつ引き抜けるか、ということが重要となる。

2.2.3.2 引き抜き試験結果

(1)引張荷重-開口変位関係

ひょうたん型試験体の引き抜き試験により得られた引張荷重-開口変位曲線を図2.2.4に示す。ここで16mm、32mm、48mmはスチールコードのカット長さを表す。

3c-16mmでは2体の試験体においてクリップゲージ装着時にスチールコードが抜けてしまったため、これらについては測定を行うことができなかった。又、3c-48mmでは全ての試験体においてスチールコードの破断が生じた。一方、3c-48mm以外において引張荷重-開口変位曲線が途中で終了しているのは、開口変位がクリップゲージの許容量を超え、測定が継続不能になったためである。

3cシリーズの引張荷重-開口変位関係は、カット長さの影響が大きく現れている。16mmにおいては、載荷前にスチールコードが引き抜けた試験体が2体あり、又、測定が行えた試験体でもその抵抗力は小さいものとなった。又、48mmでは、スチールコードの破断が生じるほどの高い抵抗力を発現した。32mmでは、ほとんどの試験体においてクリップゲージの許容量に至るまで継続的な関係が測定できた。

一方、2cシリーズでは、3cシリーズと比較してカット長さの影響が小さく、全ての試験体においてクリップゲージの許容量に至るまで測定を行うことができた。測定後の試験体を観察したところ、2cシリーズ及び3cシリーズの試験体開口面には大きな相違が見られた(図2.2.5)。2cシリーズのほとんどの試験体においては、図2.2.5(a)に示すような、スチールコードの出口付近のマトリックスの破砕が見られたが、3cシリーズではこのようなマトリックスの破砕は見られなかった。このようなマトリックスの破砕が生じると、繊維の架橋力は低下し、繊維の破断は起こりづらくなると言われている。つまり、2cシリーズではマトリックスの破砕が生じたことから、スチールコードとマトリックスの界面の面積が減少して架橋力が低下し、48mmでもスチールコードが破断することなく引き抜けたと考えられる。ここで、2cシリーズにおいてのみマトリックスの破砕が生じた原因は、そのマトリックスの破壊靱性にあると考えられる。スチールコードの表面形状には凹凸があるため、引き抜け抵抗力は、その凹凸とマトリックスが咬み合うことによるところが大きいと考えられる。そのため、マトリックスの破壊靱性が高い2cでは、スチールコード周りのマトリックスが破損することなく咬み合い抵抗したため、スチールコードの出口付近のマトリックスに応力が過剰に集中して、マトリックスの破砕を招いたと考えられる。マトリックスの破砕が起こった後は、先に述べたように界面の面積が減少したために架橋力が減少したと考えられる。又、引張荷重-開口変位曲線において極大値が何度か現れているが、これもスチールコードの凹凸とマトリックスと咬み合ったためと考えられる。

(2)引き抜け抵抗性能

図2.2.6に引き抜き試験における最大引張荷重、及び引張荷重-開口変位曲線の開口変位2.5mmまでの曲線下の面積 $A_{2.5mm}$ 、そして $A_{2.5mm}$ を最大引張荷重及び評価変位である2.5mmで除することにより無次元化した値を引き抜け抵抗性能を表す指標として示す。繊維は高い抵抗力を維持しながら引き抜けることが望

表2.2.4 プレーンマトリックスの物性

	動弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	$G_{jc}$ (N/m)
3c-1	18.594	48.4	7.046
3c-2	18.673	49.0	7.160
3c-3	18.659	51.5	7.022
平均値	18.642	49.6	7.076
2c-1	19.433	55.7	9.446
2c-2	19.499	54.5	8.312
2c-3	19.647	54.8	9.505
平均値	19.526	55.0	9.087

ましいという観点から、引き抜け抵抗性能は上記の方法により求めている。

最大引張荷重では、スチールコードの破断が生じた3c-48mmが極端に高い値を示しており、その荷重はスチールコードの破断荷重とほぼ一致している。最大引張荷重では、2cシリーズ、3cシリーズの何れにおいてもカット長さが長くなるに従い増加する傾向がある。一方、各シリーズの曲線下の面積 $A_{2.5mm}$ の関係を見ると、2cシリーズの方が何れのカット長さにおいても高い値を示している。3c-48mmでは繊維が破断したため大きな開口変位を得ることができず、それに伴い $A_{2.5mm}$ も低下したと思われる。引き抜け抵抗性能では各シリーズの関係は異なるものとなった。ここでは2cシリーズ、3cシリーズ共に、カット長さ32mmにおいて最も高い値を示している。これは、48mmでは最大引張荷重は最も高いが、最大荷重後に急激に降下するためと考えられる。ここで最も高い値を示しているのは2c32mmであり、このマトリックスとスチールコードの組み合わせにおいて、高い抵抗力を維持しながら引き抜けていくという引き抜け抵抗性能に富んだ挙動が得られることがわかった。

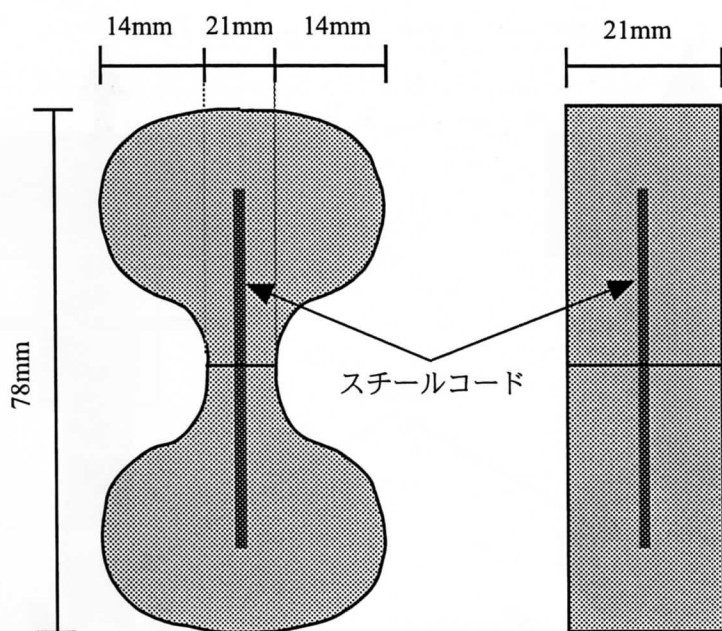


図2.2.1 ひょうたん型試験体の概略図

セパレータ(OHPシート)  
マトリックスに張り付くことを  
想定し2枚重ねとした。

繊維台(スタイロフォーム)  
(幅10mm、厚さ3mm)  
切り欠きを設けスチールコードを固定した。

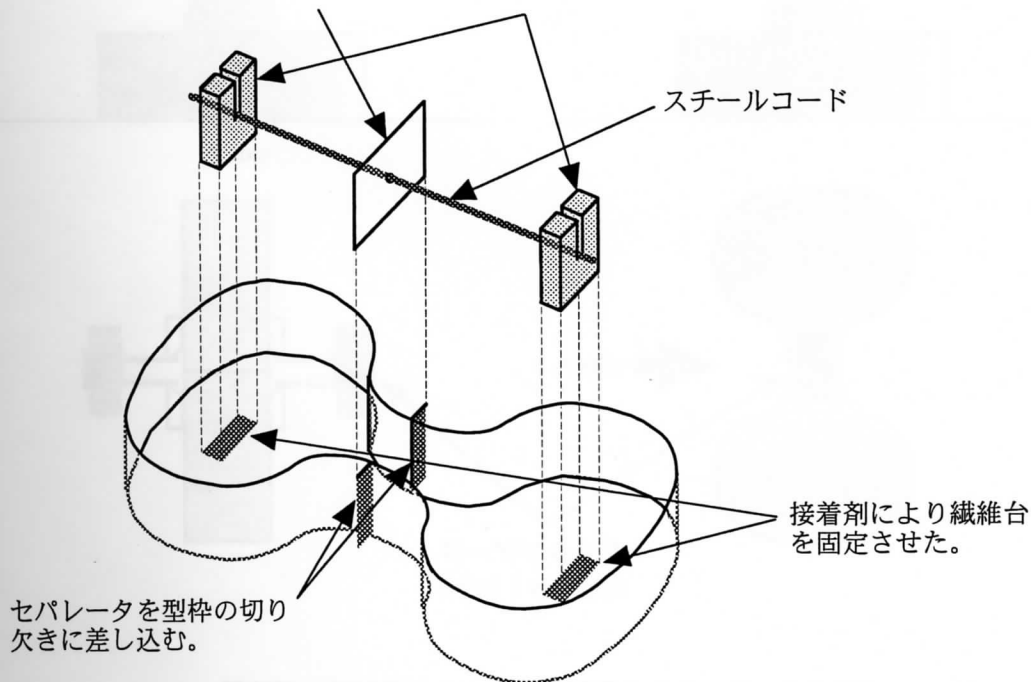


図2.2.2 ひょうたん型試験体の型枠作製概略図



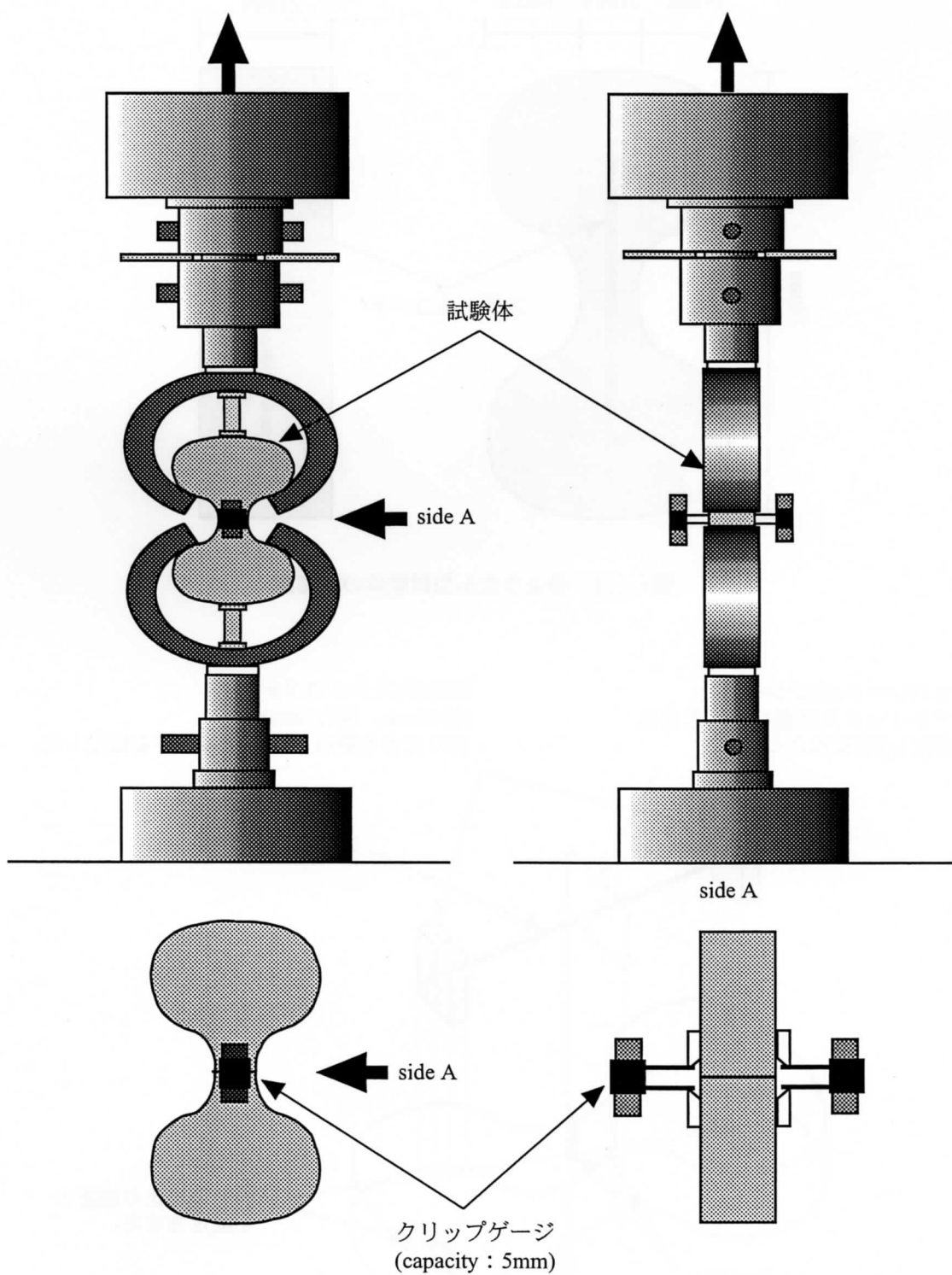


図2.2.3 ひょうたん型試験体による付着試験の概略図

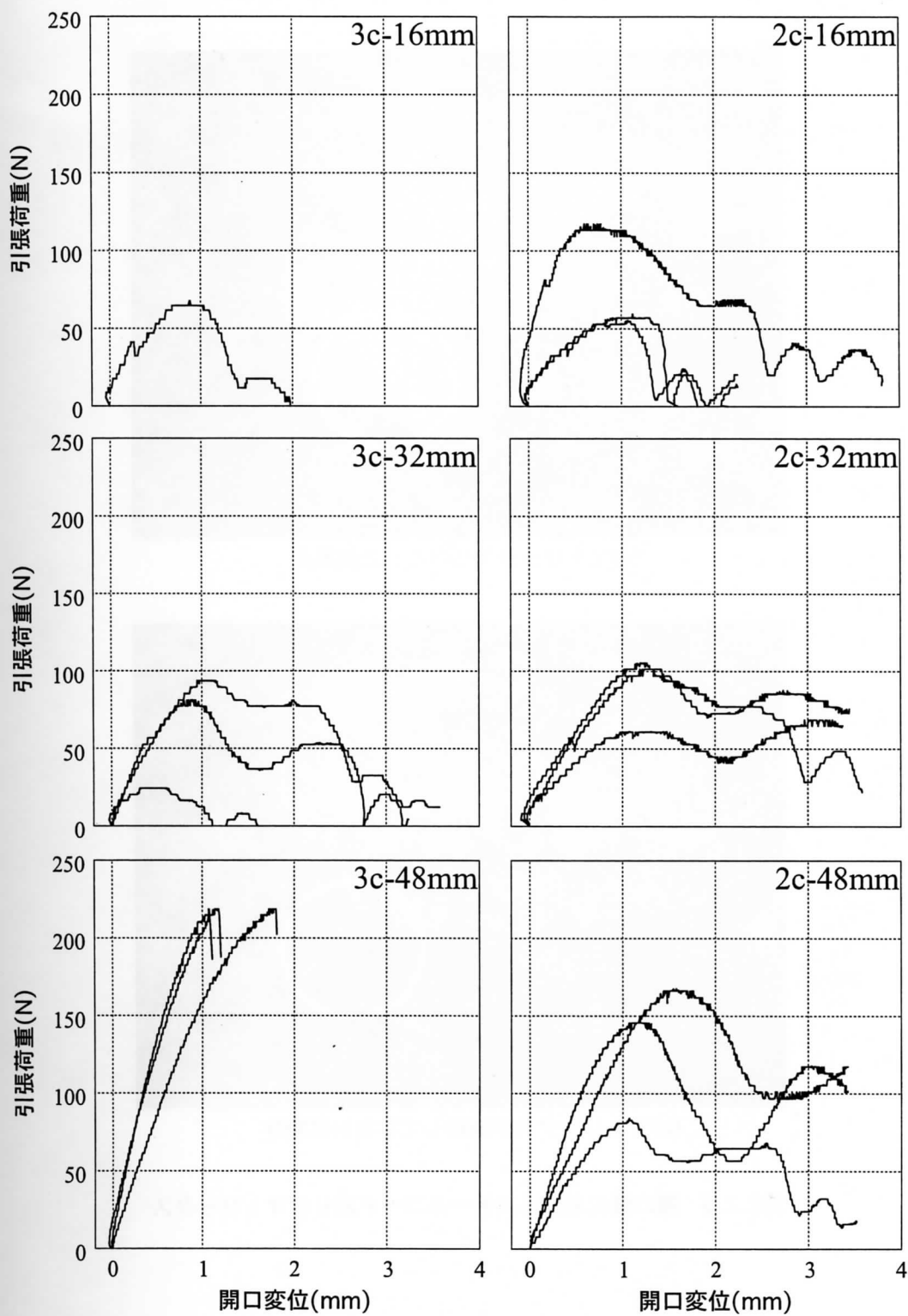
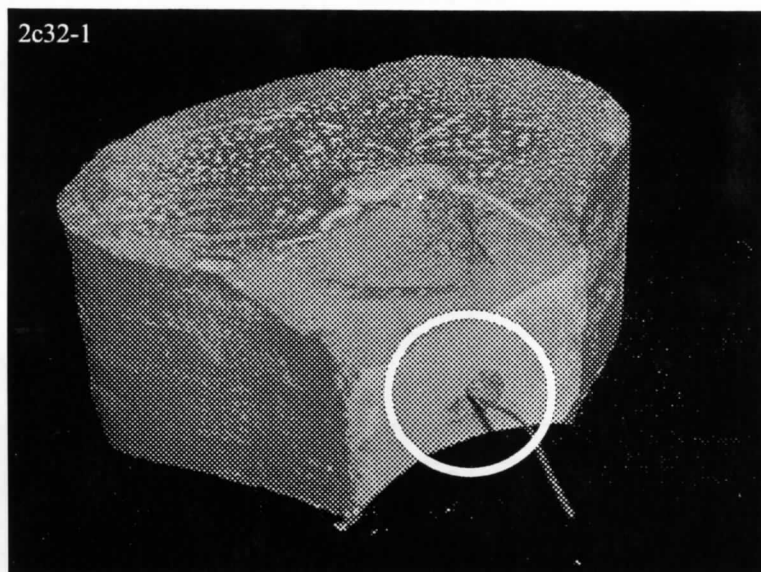
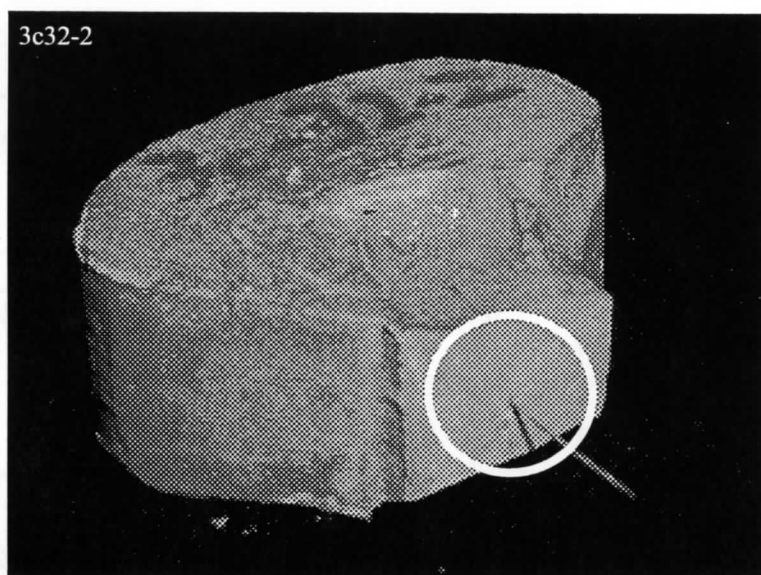


図2.2.4 付着試験により得られた引張荷重-開口変位曲線



(a)マトリックスが破碎した試験体



(b)マトリックスが破碎していない試験体

図2.2.5 開口面におけるスチールコード周りのマトリックス

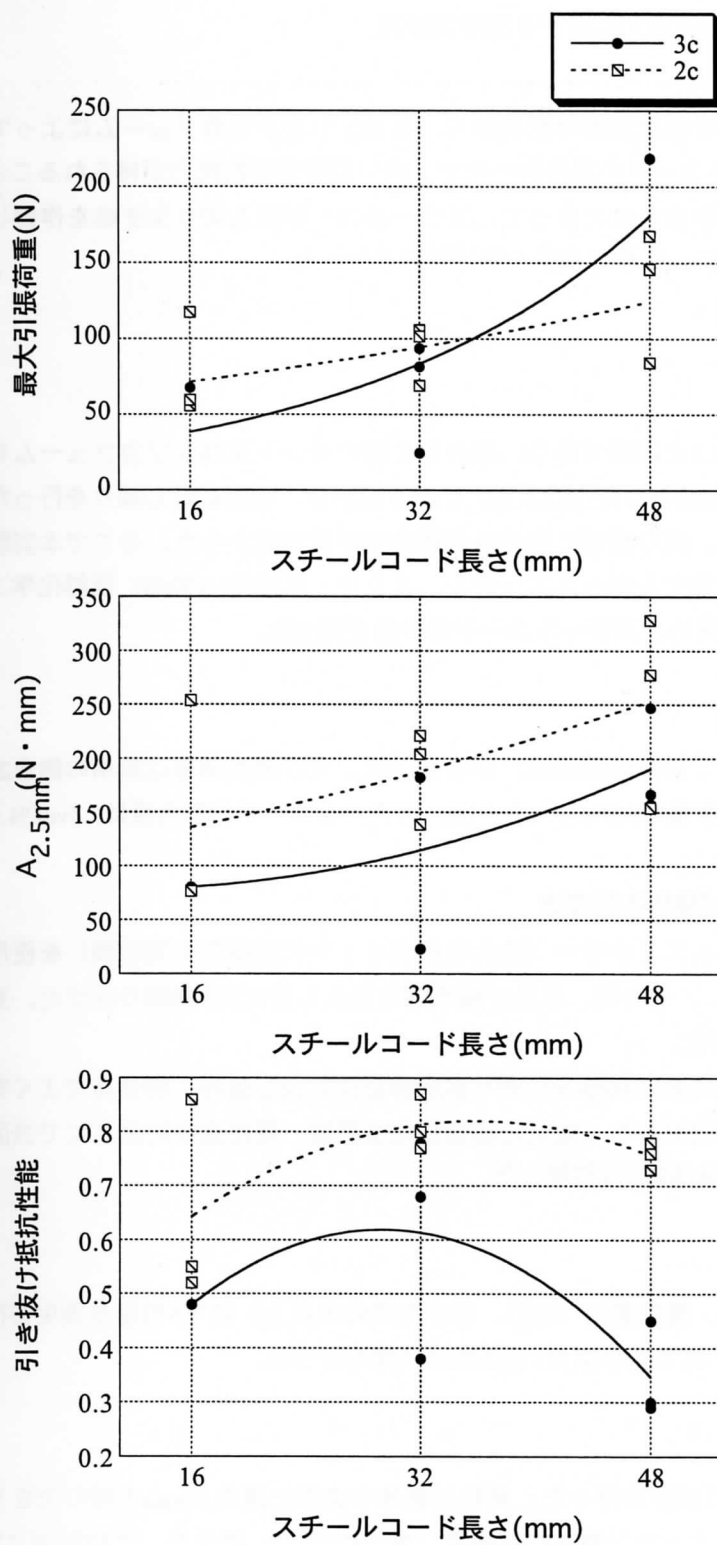


図2.2.6 各シリーズの最大引張荷重、 $A_{2.5mm}$ 及び引き抜け抵抗性能

## 2.3 スチールコード混入FRCCに関する実験的検討

### 2.3.1 概要

スチールコードの引き抜き試験の結果から、セメントとシリカフュームによって構成されたマトリックスと32mmのスチールコードの組み合わせで、高い引き抜け抵抗力が得られることが確認できた。そこで本実験では同様の組み合わせによって、スチールコード混入切り欠き梁を作製し、その基本的な挙動を観測することを目的に、切り欠き梁の曲げ試験を行った。

### 2.3.2 実験方法

#### 2.3.2.1 使用材料

使用した材料は表2.2.1と同様である。結合材にはセメント及びシリカフュームを使用し、スチールコードのカット長さは32mmとした(表2.2.2)。しかしながら、事前に試し練りを行ったところ、スチールコードの曲げ剛性が高く、練り混ぜにおける分散性が非常に悪かった。そこで本実験では増粘材（比重：1.2~1.3、主成分：水溶性セルロースエーテル、メトロース90SH-30000、信越化学工業社製）を使用し、マトリックスの粘性を高め、スチールコードの分散を図った。

#### 2.3.2.2 調合

マトリックスにおける粉体の構成比、水結合材比、及び減水剤量は前項の調合2cと同様である。増粘材量は水と減水剤の総重量の0.6%とした。又、スチールコードの混入量は1.5vol.%とした。

#### 2.3.2.3 練り混ぜ及び試験体作製方法

練り混ぜには真空オムニミキサー（最大容量10ℓ：千代田技研工業社製）を使用した。まず結合材を投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し更に3分間練り混ぜた。更にスチールコードを投入して5分間練り混ぜた。

練り混ぜた後は、40×40×160mmの角柱試験体型枠に流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないように振動を与え、成形した。空気に解放した上面は、硬化途中に金こてで表面仕上げ（キャッピング）を施した。又、試験体は3体作製した。

#### 2.3.2.4 養生方法

試験体は打ち込み後、養生室内（20℃、相対湿度90%以上）にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に曲げ試験を行った。

#### 2.3.2.5 試験方法

切り欠き梁の3点曲げ試験を行った。角柱試験体中央部に深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッターにて設置して、インストロン製万能試験機（最大能力2tf）により、変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行い、荷重-CMOD曲線を測定した。

2.3.3 実験結果及び考察

図2.3.1に切り欠き梁の3点曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を示す。スチールコードを混入した場合、第3章における合成繊維を混入した場合と比較して、強度・靱性に富んだ挙動が得られた。又、練り混ぜにおいても、増粘材を投入することにより、スチールコードの分散性に向上が見られた。

しかしながら、切り欠き先端の破断面状況を観察したところ、マトリックスの脆性的且つ大きなひび割れが多く見られた（図2.3.2）。これは、スチールコードの曲げ剛性が高いために生じた、スナッピングによるマトリックスの破碎が原因と考えられる。スナッピングとは、ひび割れ面に対して繊維が傾斜している時に、ひび割れ出口付近において繊維とマトリックスが引っ掛かることにより、架橋力が増大する現象のことであり、時には繊維の破断を招く。スチールコードは強度・剛性が高いため、マトリックスの方がスナッピングによる応力集中によって脆性的に破損したと言える。しかしながら、グラフ形状を見ると、靱性的な曲げ挙動を示していることから、スチールコードは合成繊維を混入したFRCCで形成される微細なひび割れより大きなメゾレベルのひび割れを補強するには有用であると考えられる。そのため、スナッピングによるマトリックスの脆性的な破碎を防止して、スチールコードの性能を可能な限り発現することにより、更に強度・靱性に富んだ挙動が得られるものと考えられる。そこで、マトリックスに合成繊維を混入することにより、靱性的なマトリックスへと改善した。つまり、スチールコードと合成繊維によるハイブリッド型繊維補強である。次項ではハイブリッド型繊維補強に関する基礎的な性質について検討する。

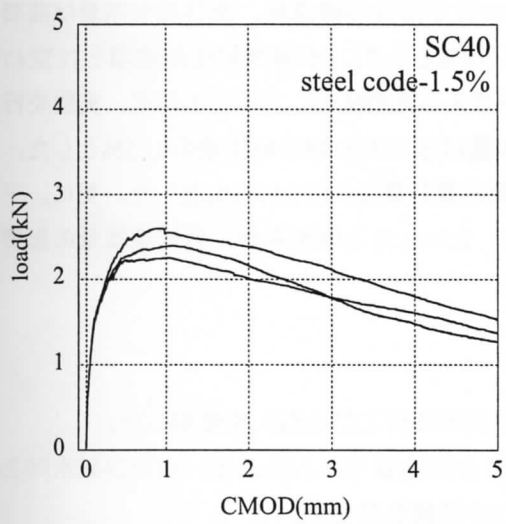


図2.3.1 スチールコード混入切り欠き梁の荷重-CMOD曲線

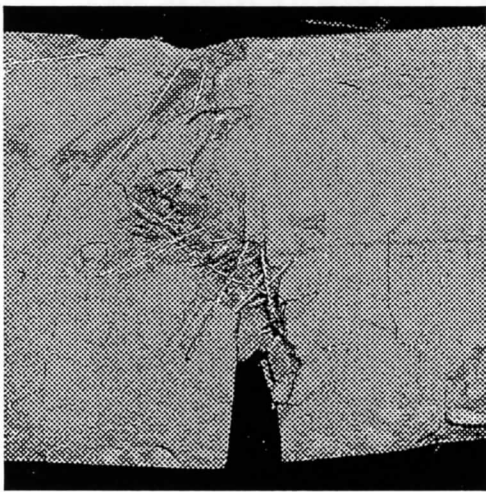


図2.3.2 切り欠き先端のひび割れ状況 (SC40-1)



## 2.4 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料に関する実験的検討

### 2.4.1 概要

前項では、スチールコードの強度・曲げ剛性が高いため、スナッピングによりマトリックスの脆的な破砕が見られた。FRCCでは少数の大きなひび割れが発生するより、複数の微細なひび割れが発生した方が好ましい。これは、ひび割れ進展面積の増大に伴い吸収されるエネルギーが増加されることによる。そこで本項では、マトリックスが複数ひび割れを形成するために、且つスチールコードの持つ性能を可能な限り引き出すために、合成繊維を混入することによりスチールコード周りのマトリックスが靱性挙動を示すよう改善し、スチールコードと合成繊維によるハイブリッド型繊維補強を試みた。又、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下、HFRCCと呼ぶ）では練り混ぜにおいて、合成繊維を先に投入することにより粘性は高くなると考えられるため、増粘材を使用しなくともスチールコードの分散性は向上すると考えられる。ここでは基礎的研究として、HFRCC切り欠き梁の3点曲げ試験を行い、高強度・高靱性挙動を示すFRCC開発に向けて、その有効性を検討した。

### 2.4.2 実験方法

#### 2.4.2.1 使用材料

マトリックスにおける使用材料を表2.4.1に、使用した繊維を表2.4.2に示す。合成繊維にはアスペクト比の近い形状のアラミド、PVA、及びポリエチレン1を採用し、繊維種による影響を検討した。更にポリエチレン繊維では、アスペクト比の大きい形状のものも使用し、その影響を検討した。

#### 2.4.2.2 調合

各シリーズの調合を表2.4.3に示す。マトリックスにおける粉体の構成比、及び減水剤量は前項と同様としたが、水結合材比は繊維の分散性の向上を考慮し30%とした。水結合材比が前項とは変わったため、ここではHFRCCと同様に、スチールコードのみを混入したFRCCについても再度、実験を行った。増粘材はスチールコード混入FRCCにのみ使用し、その量は水と減水剤の総重量の0.15%とした。又、何れのシリーズにおいても、スチールコード及び合成繊維の混入量は共に1.5vol.%とした。更に、アラミド繊維を混入するシリーズにおいては、合成繊維量を2.0、2.5vol.%と増加させ、合成繊維量の影響を検討した。

#### 2.4.2.3 練り混ぜ及び試験体作製方法

練り混ぜには真空オムニミキサー（最大容量10ℓ：千代田技研工業社製）を使用した。

スチールコード混入FRCCでは、まず粉体を投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し更に3分間練り混ぜた。更にスチールコードを投入して5分間練り混ぜた。

HFRCCでは、粉体を投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し3分間練り混ぜた。更に合成繊維を投入し5分間練り混ぜ、その後、スチールコードを投入して5分間練り混ぜた。

練り混ぜた後は、40×40×160mmの角柱試験体型枠に流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないように振動を与え、成形した。空気に解放した上面は、硬化途中に金こてで表面仕上げ（キャッピン

表2.4.1 使用材料

	略号	比重	備考	製造元及び製品名
セメント	C	3.14	平均粒径：13 $\mu\text{m}$	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	平均粒径：0.15 $\mu\text{m}$	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ
高性能AE減水剤	SP	1.1	主成分：芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリックFP200U
増粘材	-	1.2~1.3	主成分：水溶性セルロースエーテル	信越化学工業社製 メトロース90SH-30000

表2.4.2 使用した繊維

繊維種類	比重 ( $\text{g/cm}^3$ )	Lf (mm)	df ( $\mu\text{m}$ )	Lf/df	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	破断荷重 (N)
スチールコード(SC)	7.84	32	380	84.2	-	-	230.5
アラミド(A)	1.39	6	12	500	3400	72.5	-
PVA(V)	1.3	18	37	486	1960	47	-
ポリエチレン1(P1)	0.97	15	34	441	1650	42	-
ポリエチレン2(P2)	0.97	30	12	2500	2580	73	-

表2.4.3 調合

略号	vol.% of solid part		減水剤量	増粘材量	W/B (wt.%)	SC量 (vol.%)	合成繊維量 (vol.%)
	C	SF					
SC30	79.3	20.7	2 (粉体に対する重量比)	0.15	30	1.5	-
hyA1				(水及び減水剤の総重量に対する重量比)			1.5
hyA2				2.0			
hyA3				2.5			
hyV				1.5			
hyP1				1.5			
hyP2				1.5			

グ) を施した。又、試験体は各シリーズずつ3体作製した。

2.4.2.4 養生方法

試験体は打ち込み後、養生室内（20℃、相対湿度90％以上）にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に曲げ試験を行った。

2.4.2.5 試験方法

切り欠き梁の3点曲げ試験を行った。角柱試験体中央部に深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッターにて設置して、インストロン製万能試験機（最大能力2tf）により、変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行い、荷重-CMOD曲線を測定した。

2.4.3 実験結果及び考察

2.4.3.1 練り混ぜ状況

表2.4.4に各シリーズのフロー値を示す。SC30には増粘材を用いてマトリックスの粘性を高めスチールコードの分散性を向上させたが、ハイブリッド化を施したシリーズでは増粘材を使用しなくとも、合成繊維を先に投入することにより粘性が高まり、十分な分散性を確保することができた。

2.4.3.2 荷重-CMOD曲線

図2.4.1に切り欠き梁の3点曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を示す。まず、前項で実験を行ったW/B=40%のスチールコード混入FRCC(SC40)と、本項で行ったW/B=30%のそれ(SC30)を比較する。SC30では、最大荷重以前の挙動に多少のばらつきはあるものの、SC40と比較すると水結合材比の影響はほとんど見られない。ここで、この二つの水結合材比におけるセメントペーストマトリックスの物性を表2.4.5に示す。P40はSC40のマトリックス、P30はSC30のマトリックスである（Pはプレーンを意味する）。これを見ると二つのマトリックスの物性は大きく異なる。先に行われた引き抜き試験の結果では、スチールコードの引き抜け抵抗性能に及ぼすマトリックスの影響が観察されたが、切り欠き梁の曲げ試験を行ったところ、その影響は顕著には見られなかった。

次に、ハイブリッド型繊維補強の効果を検討する。図2.4.1によりスチールコード混入FRCCとHFRCCを比較すると、ハイブリッド化により強度・靱性が向上したと言える。アラミド繊維とのハイブリッド型繊維補強を施したhyA1~3では、合成繊維量を増すことにより、最大荷重が増大しており、強度の面での向上が見られる。一方、PVA繊維とのハイブリッド型繊維補強(hyV)、及びポリエチレン繊維とのハイブリッド型繊維補強(hyP1、hyP2)においても、ハイブリッド化による強度及び靱性の向上が確認できる。特に、ポリエチレン繊維によるハイブリッド化では、靱性において大幅な向上が見られた。しかしながら、ポリエチレン繊維のアスペクト比による影響はほとんど見られない。

ここで、繊維種の影響について着目すると、ハイブリッド化による荷重-CMOD曲線に明確な関係が見られる。つまり、アラミド繊維のような小さい歪

表2.4.4 フロー値

	フロー値 (mm)
SC30	110×115
hyA1	125×125
hyA2	110×115
hyA3	105×115
hyV	140×150
hyP1	135×140
hyP2	115×120

みに高い荷重が得られる繊維では、ハイブリッド化した後もそのような傾向を示し、又、ポリエチレン繊維のような靱性に富んだ挙動を示す繊維においても同様に、ハイブリッド化後もその影響を大きく受ける。このようにハイブリッド化では、構成する繊維の影響が大きく関与することが確認できた。

### 2.4.3.3 切り欠き先端のひび割れ状況

曲げ試験後の切り欠き先端のひび割れ状況を観察したところ、各シリーズにおいて大きな相違が見られた。図2.4.2-1及び図2.4.2-2に各シリーズのひび割れ状を示す。hyA1~3では、SC30に見られたようなマトリックスの脆性的な破壊は減少しており、ハイブリッド化に

よりひび割れの微細化が見られる。つまり、合成繊維を混入することにより、スチールコード付近のマトリックスは靱性的になった。そのため、スナッピングによりスチールコード周辺のマトリックスが脆性的に破砕することが減少したので、拘束力が向上し高い引き抜け抵抗性能が得られたと言える。そのため、高強度・高靱性挙動を示したと考えられる。しかしながら、アラミド繊維とのハイブリッド化では、未だひび割れ幅は広く、複数ひび割れはほとんど確認できなかった。そのため、PVA繊維及びポリエチレン繊維とのハイブリッド化と比較し、最大荷重後の降下度は急になったと考えられる。

一方、PVA繊維、及びポリエチレン繊維とのハイブリッド化では、複数ひび割れの形成が見られた。特に、ポリエチレン繊維とのハイブリッド化では、全ての試験体において複数ひび割れが確認できた。このことから、荷重-CMOD曲線において最大荷重後の降下度が緩やかになったと言える。

### 2.4.3.4 ハイブリッド型繊維補強の簡便的比較検討

先に実験が行われた合成繊維のみが混入されたFRCC及びスチールコードが混入されたFRCCと、HFRCCとでは全体の繊維の混入率が異なるため、曲げ試験結果を直接的に比較検討することは難しい。そこでここでは、ハイブリッド型繊維補強による効果を簡便的に検討するため、合成繊維のみが混入されたFRCCとスチールコードが混入されたFRCCの曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を単純に加算合成して求められた荷重-CMOD曲線と、HFRCCの荷重-CMOD曲線とを比較することとした。ここでは、30mmのポリエチレン繊維とスチールコードによるhyP2のみについて比較検討した。図2.4.3(a)は3.3節で行われたポリエチレン繊維のみが混入されたFRCCの曲げ試験結果の中でW/B=30%においてAE剤が添加されていない調合の荷重-CMOD曲線である。このFRCCのマトリックスの調合及び使用されたポリエチレン繊維はhyP2と同様であるため、加算合成の要素として選択した。又、図2.4.3(b)は4.3節で行われたスチールコードのみが混入されたFRCCの荷重-CMOD曲線であり、マトリックスの調合は増粘剤以外hyP2と同様である。図2.4.3(c)はhyP2の荷重-CMOD曲線であり、比較のため再度示した。図2.4.3(d)は、図2.4.3(a)と(b)の荷重-CMOD曲線を平均化して、それぞれ一本の曲線を作製し、その後、それぞれの荷重を足し合わせて合成した仮想的な荷重-CMOD曲線である。

図2.4.3(c)と(d)とを比較すると、加算合成されている(d)では2体分のマトリックス ((a)と(b)のそれぞれ

表4.4.5 マトリックスの物性

	動弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	$G_{IC}$ (N/m)
P40-1	15.3	37.4	7.90
P40-2	15.1	30.6	6.56
P40-3	15.4	35.5	6.39
平均値	15.3	34.5	6.95
P30-1	24.7	75.3	12.8
P30-2	24.7	71.7	13.0
P30-3	24.8	58.2	11.9
平均値	24.7	68.4	12.6

のマトリックス)が足し合わされているにも関わらず、(c)は(d)より高い最大荷重を示している。又、最大荷重以降の挙動を比較しても、(c)のほうが高い荷重を維持しており靱性的な挙動を示していると言える。更に、最大荷重を示すCMODも(c)のほうが大きく変形が進んでも高い曲げ荷重に耐えられることを示している。以上のことから、ハイブリッド型繊維補強による効果は、ただ単純にそれぞれの繊維の混入されたFRCCの性能を足し合わせただけではなく、足し合わせる以上の相乗効果があることがわかる。この要因については次節で触れることとする。

#### 2.4.3.5 靱性評価

ここでは、3点曲げ試験で得られた荷重-CMOD曲線を用いて、靱性能を定量的に評価した。まず、CMOD=5mmまでの曲線下の面積を求めた。本実験では、載荷点変位はCMODの約82%であったため、曲線下の面積は吸収エネルギーの約82%の値となる。次に、曲線下の面積を最大荷重及びCMOD5mmで除した値を靱性評価指標として用いた。その結果を図2.4.4に示す。

スチールコードのみを混入したFRCC(SC)が比較的高い値を示しているが、これはSCでは最大荷重は低いものの、その後の降下度は緩やかであることを意味している。しかしながら、合成繊維のみを混入したFRCC(PE)は最も低い値を示していることから、スチールコードを使用することにより靱性能は向上することが確認できる。更に、ハイブリッド型繊維補強を施すことにより高靱性及び高強度が可能となることが確認できる。hyA1~3では、合成繊維の増加に伴い低下する傾向が得られた。これは荷重-CMOD曲線を見ると、アラミド繊維の増加に伴い、最大荷重後の降下度は急激になってからである。アラミド繊維は化学付着強度が高く摩擦付着強度は低いために多量に混入すると最大荷重は高くなるものの、最大荷重以降の靱性能は落ちるという合成繊維の性能が反映しているものと考えられる。又、ポリエチレン繊維とのハイブリッド化を施したシリーズが高い値を示しており、この組み合わせが、スチールコードの性能を最大限に発現するために有効であり、高強度・高靱性を可能にするものと結論付けられる。又、hyP2と加算合成した曲線の靱性能を比較すると、hyP2のほうが高い値を示していることから、ただ単純にそれぞれの繊維の混入されたFRCCの性能を足し合わせただけではなく、足し合わせる以上の相乗効果があったことが確認できた。

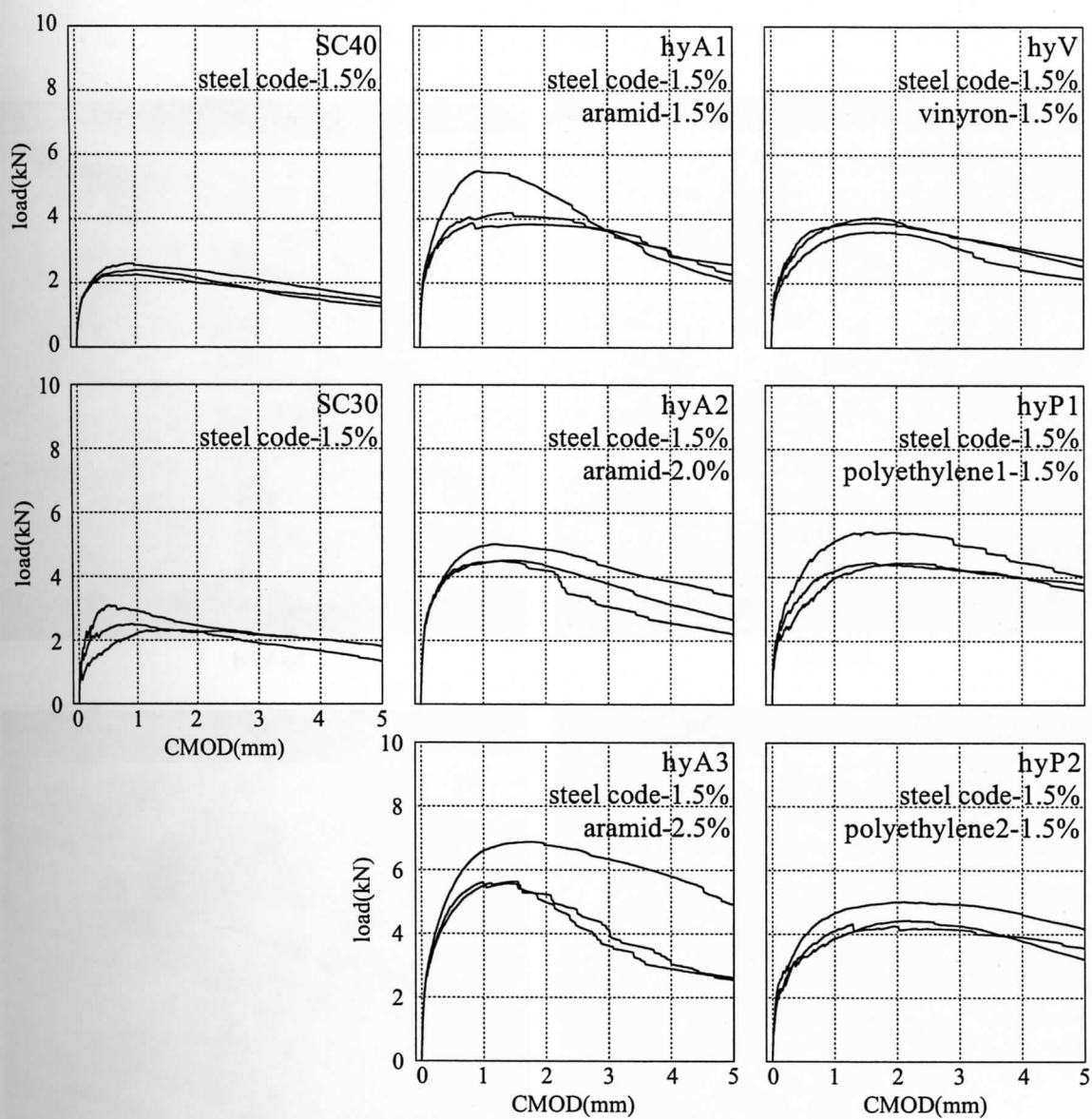
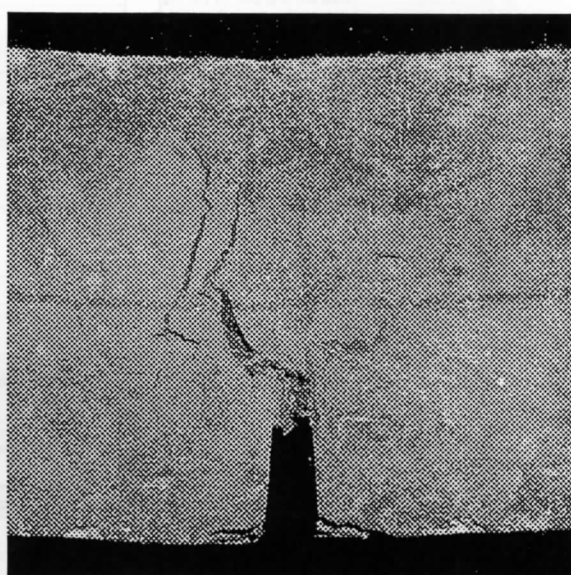


図2.4.1 切り欠き梁の3点曲げ試験により得られた荷重-CMOD曲線

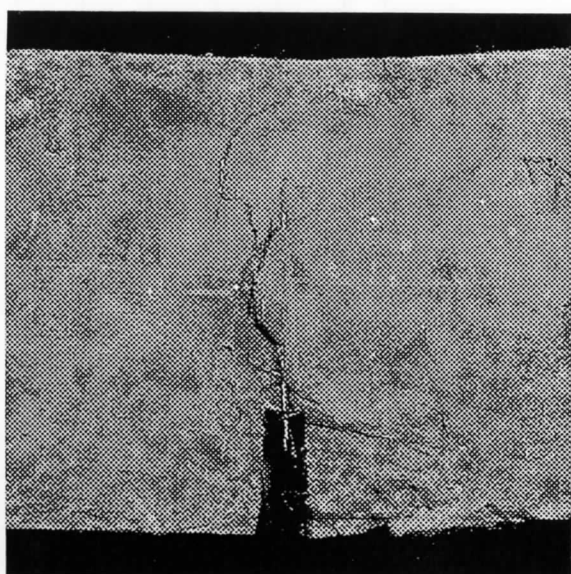




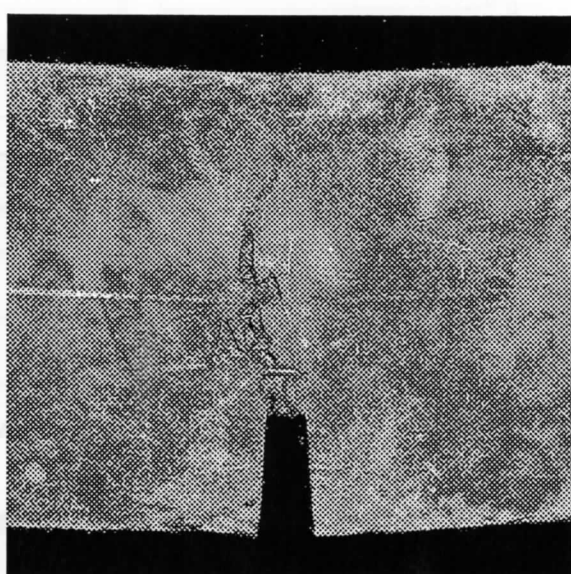
SC30-1



hyA1-1

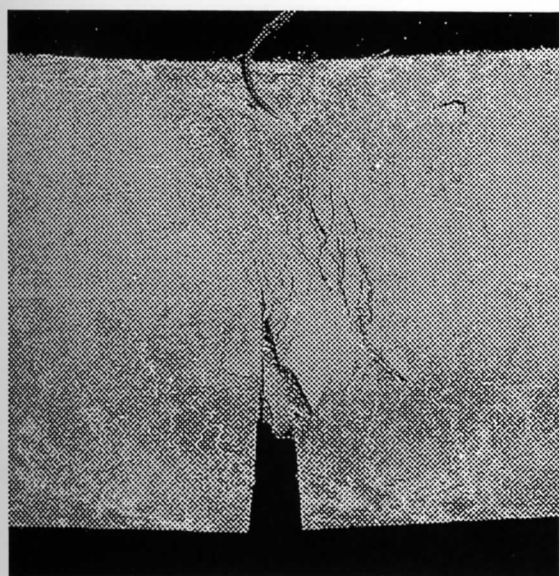


hyA2-2

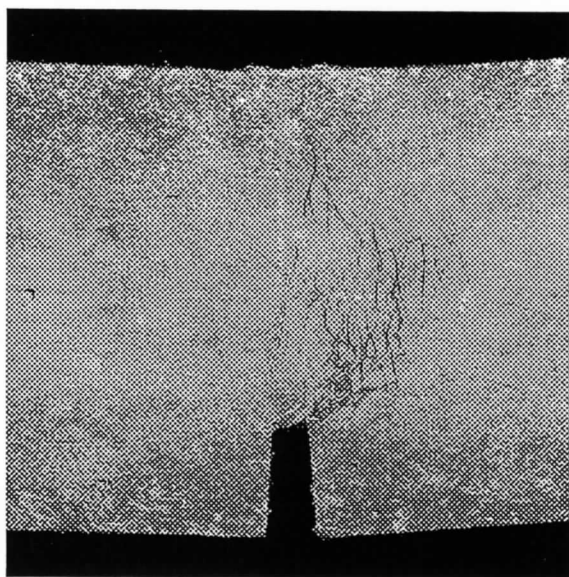


hyA3-2

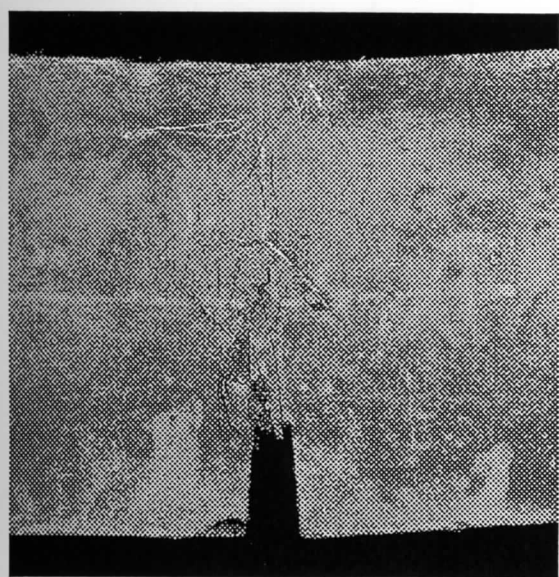
図2.4.2-1 切り欠き先端のひび割れ状況



hyV-2

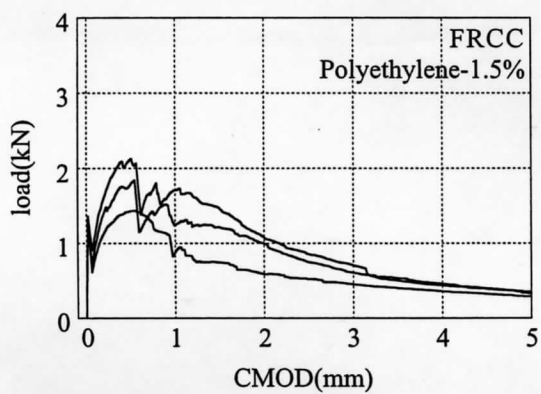


hyP1-1

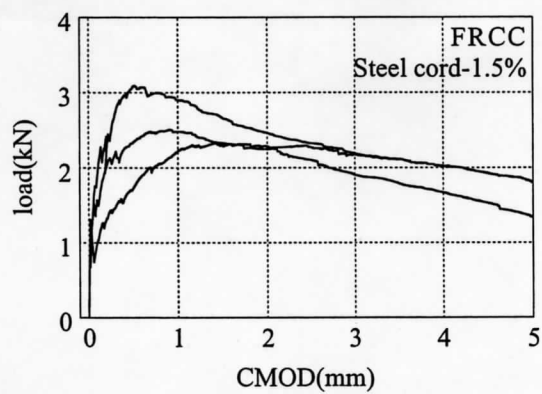


hyP2-1

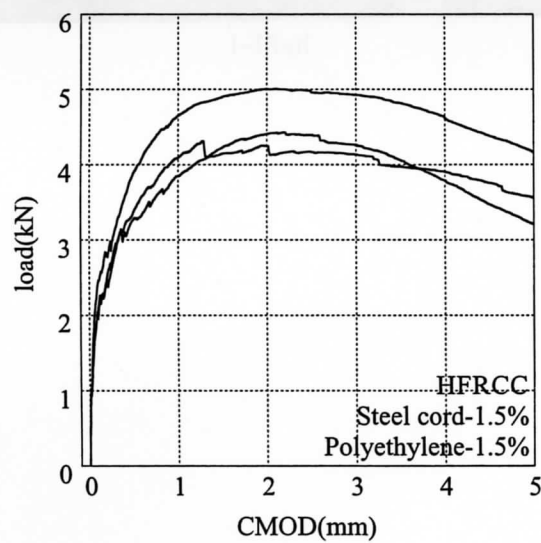
図2.4.2-2 切り欠き先端のひび割れ状況



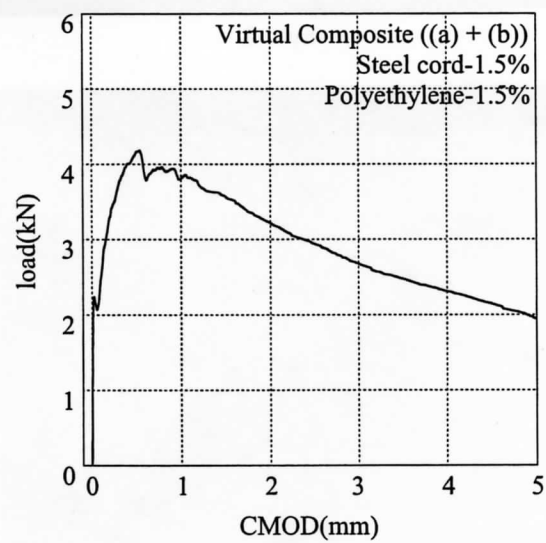
(a)合成繊維のみが混入されたFRCC(PE)



(b)スチールコードのみが混入されたFRCC(SC30)



(c)hyP2



(d)加算合成

図2.4.3 比較検討のための荷重-CMOD曲線

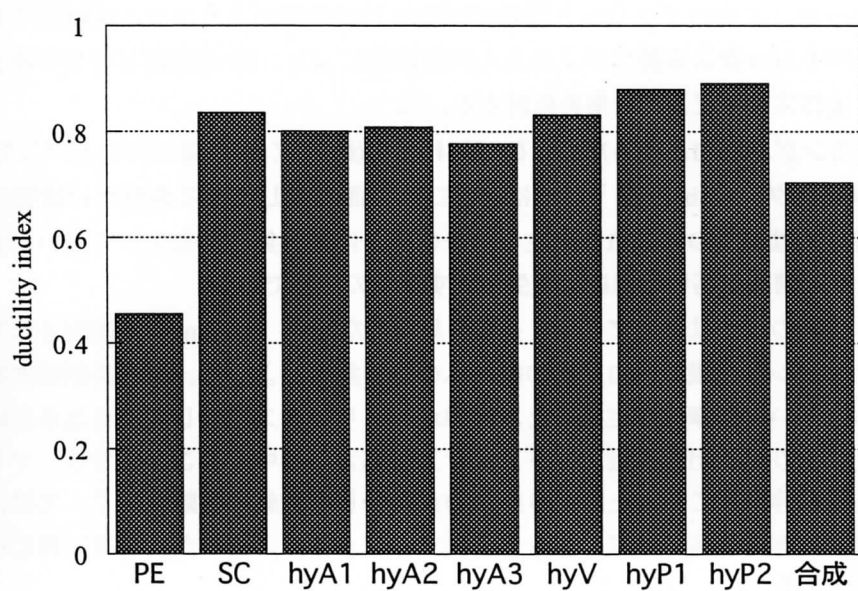


図2.4.4 各シリーズの最大荷重及び靱性指標

## 2.5 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料におけるスチールコードの引き抜け性能に関する検討

### 2.5.1 概要

前節では、HFRCCについて、その基礎的性能、特に最大荷重以降の靱性能について評価を行った。その結果、HFRCCでは、単純に2種類の繊維を混入したときに得られると予想される性能以上の性能が得られることがわかった。このハイブリッド型繊維補強の相乗効果のメカニズムを解明するために、合成繊維が混入されたマトリックスを持つひょうたん型試験体により、HFRCCにおけるスチールコードの引き抜け抵抗性能、及びスナッピング効果を検討する。

FRCC中の繊維はランダム配向となるため、ひび割れ発生後、ひび割れ面に対し傾斜して架橋する繊維が現れる。スナッピング (snabbing)<sup>3),4),5)</sup>とは、ひび割れ面に対してある角度だけ繊維が傾斜した場合に、繊維の出口付近には繊維のよじれが発生し、その部分に応力集中が発生して高い界面摩擦を発生させるようになり、その結果、高い架橋応力を生み出す現象のことである。

それに加えて、繊維の下では脆性マトリックスの局所的な破砕 (spalling) が観察されている。先に述べたように、スナッピングは繊維出口付近の繊維への応力集中によって、高い界面摩擦を生じさせるものである。しかし、高い界面摩擦が生じると、繊維がマトリックスに対して大きな垂直応力を作用させることにもなる。つまり繊維出口付近のマトリックスに応力が集中することになり、マトリックスは破損する。普通、この破砕が起こることにより架橋力が減少し、繊維の破断を防ぐ、又は、遅らせるのだが、鋼繊維などの曲げ剛性の高い繊維の場合、このマトリックスの粉砕が大規模に起こり架橋力が著しく低下する可能性がある。

ここでは、ひょうたん型試験体を用いた引張試験により、3種類の水結合材比、合成繊維の有無及び種類がスチールコードの引き抜け抵抗性能及びスナッピング効果に及ぼす影響について実験的に検討する。

### 2.5.2 実験方法

#### 2.5.2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表2.5.1に、スチールコード及び合成繊維の物性を表2.5.2に示す。合成繊維の種類はPVA繊維とポリエチレン繊維の2種類を用いた。そのため、ひょうたん型試験体のマトリックスとしては、2種類の合成繊維が混入されたFRCCとプレーンマトリックスの3種類となる。

#### 2.5.2.2 調合

試験体作製方法の詳細は2.2節と同様であるため割愛する。調合を表2.5.3に示す。W/B=42%の調合ではシリカフュームを加えず増粘剤が加えてある。これはセメントペーストの粘性を高め合成繊維の分散を向上するためである。又、マトリックスに混入する合成繊維の量は1.5vol.%とした。

表2.5.1 使用材料

	略号	比重	備考	製造元及び製品名
セメント	C	3.14	平均粒径：13 $\mu\text{m}$	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	平均粒径：0.15 $\mu\text{m}$	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ
高性能AE減水剤	SP	1.1	主成分：芳香族アミノスルホン 酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリックFP200U
増粘剤	VA	1.2~1.3	主成分：水溶性セルロースエーテル	信越化学工業社製 メトロース90SH-30000

表2.5.2 繊維物性

繊維種類	比重 ( $\text{g/cm}^3$ )	Lf (mm)	df ( $\mu\text{m}$ )	Lf/df	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	破断荷重 (N)
スチールコード(SC)	7.84	32	380	84.2	-	-	230.5
PVA	1.3	18	37	486	1960	47	-
ポリエチレン1(PE)	0.97	30	12	2500	2580	73	-

表2.5.3 調合

W/B	結合材比(wt.%)		SP/B (wt.%)	VA/(W+SP) (wt.%)
	C	SF		
27%	80	20	2.0	-
34%	80	20	2.0	-
42%	100	-	0.7	0.8

## 2.5.2.3 練り混ぜ及び試験体作製方法

練り混ぜには真空オムニミキサー（最大容量10ℓ：千代田技研工業社製）を使用した。練り混ぜでは、まず結合材を投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し更に3分間練り混ぜた。合成繊維を混入する試験体では、合成繊維を投入して更に5分練り混ぜた。

練り混ぜた後は、図2.2.2に示すような予めセッティングされたひょうたん型型枠に流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないように振動を与え、成形した。空気に解放した上面は、硬化途中に金こてで表面仕上げ（キャッピング）を施した。又、何れにおいても各シリーズ3体ずつ試験体を作製した。



#### 2.5.2.4 養生方法

試験体は打ち込み後、養生室内（20℃、相対湿度90%以上）にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に引き抜き試験及びスナッピング試験を行った。

#### 2.5.2.5 試験方法

スチールコードの引き抜き試験及びスナッピング試験では、ひょうたん型試験体を用いた。試験体の概略は図2.5.1の通りである。引き抜き試験ではスチールコードを載荷方向と0°の角度に配して、スナッピング試験では載荷方向と30°の角度に配した。JCI-SF8<sup>2)</sup>に示される方法で、インストロン製万能試験機により変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行った。試験体はセパレータにより二つのブロックで構成されており、引張試験を行うことによりセパレータの部分が開く仕組みになっている。試験体両面にはクリップゲージを取り付け荷重に伴うセパレータ部分の開口変位を測定し、その平均値を開口変位として用いた。載荷装置等の概略は2.2節と同様である。

### 2.5.3 実験結果及び考察

#### 2.5.3.1 引き抜け抵抗性能

引き抜き試験によって得られた荷重-開口変位曲線を図2.5.2に示す。W/B=42%においては、水結合材比が高いだけでなく、シリカフュームが混入されていないために、マトリックスの充填性が低下して、スチールコード表面の凹凸との引っ掛かりが十分に得られず、高い引き抜け抵抗力を示さなかったと考えられる。概して言えば、何れの水結合材比においても合成繊維を混入した効果は見られないことがわかる。これはスチールコードの凹凸が小さいがために凹凸部分に合成繊維が入り込まず、スチールコード周辺のマトリックスはプレーンのものとそれほど変わらない状態にあると推測できる。

#### 2.5.3.2 スナッピング効果

スナッピング試験によって得られた荷重-開口変位曲線を図2.5.3に示す。スナッピング試験で得られた曲線を見ると、荷重が急激に低下し、再度荷重が上昇している部分が確認できる。これはマトリックスが破砕したことを示している。この現象は特に、プレーンマトリックスのW/B=27%及び34%において顕著に確認できる。上で述べたように、普通、この破砕が生じると架橋力が減少し、繊維の破断を防ぐ、又は、遅らせると言われているが、マトリックスの破砕が顕著に見られるプレーンマトリックスの試験体では、破砕が生じた後も抵抗力は低下することなく上昇し、スチールコードの破断まで至っているものもある。これは、スチールコード出口付近において、マトリックスが破砕したときに形成されたマトリックスの凸部分とスチールコードが引っ掛かったために荷重が低下することがなかったものと考えられる（図2.5.4）。

一方、合成繊維を混入したマトリックスでは、急激な荷重の低下、すなわちマトリックスの破砕がそれほど見られず、特にW/B=27%では、マトリックスが破砕することなく、高い抵抗力を維持したままスチールコードが引き抜けていることがわかる。これは、合成繊維の混入によりマトリックスの靱性が向上したため、スチールコード出口付近で応力集中が生じてもマトリックスが破砕せず、高い摩擦抵抗を発現したためと考えられる。

以上のことを合成繊維とスチールコードの両方が混入されたHFRCCで考えた場合、多くのスチールコ



ードはランダムに配向されているため、そのほとんどはスナッピング効果が発現する状態にあると言える。マトリックスは合成繊維により補強されているためマトリックスは破碎することなく、高い抵抗力を維持したままスチールコードは引き抜けることができる。そのため、HFRCCでは単にひび割れ間を合成繊維とスチールコードの両方が架橋して抵抗するだけでなく、スチールコードが引き抜ける際に靱性的なスナッピングによる効果が加わるためにHFRCCは図2.4.3で比較検討した加算合成の曲線よりも高い靱性能を示したものと考えられる。

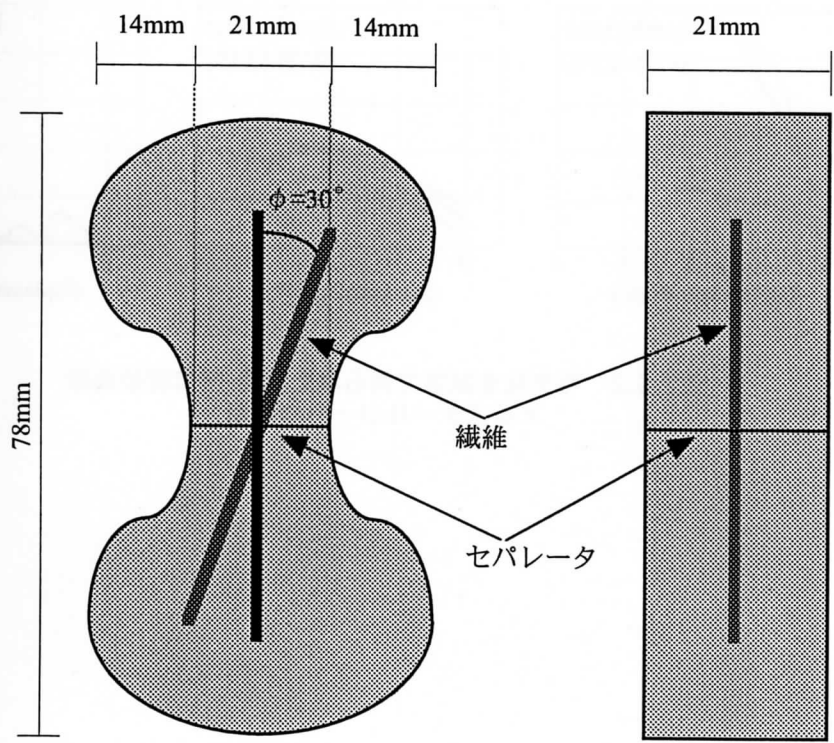


図2.5.1 ひょうたん型試験体の概略図

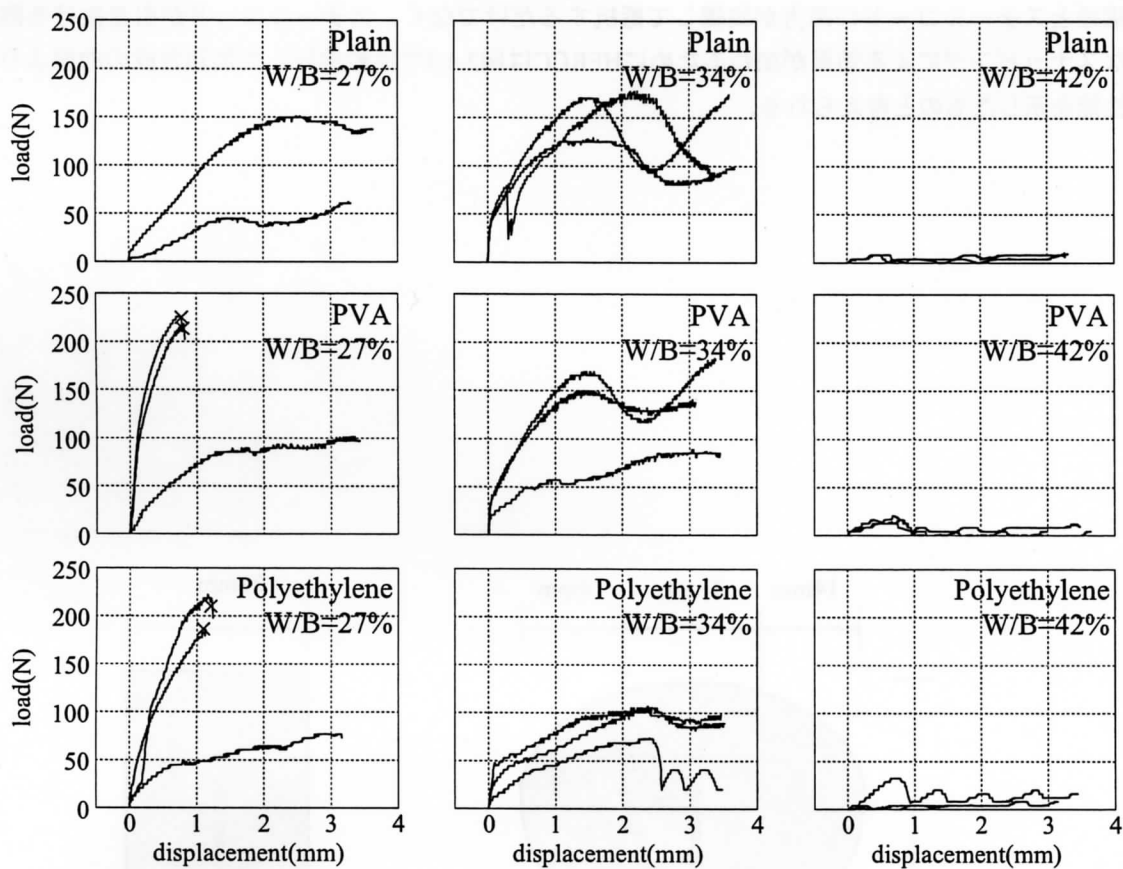


図2.5.2 引き抜き試験で得られた荷重-開口変位曲線  
×はスチールコードの破断

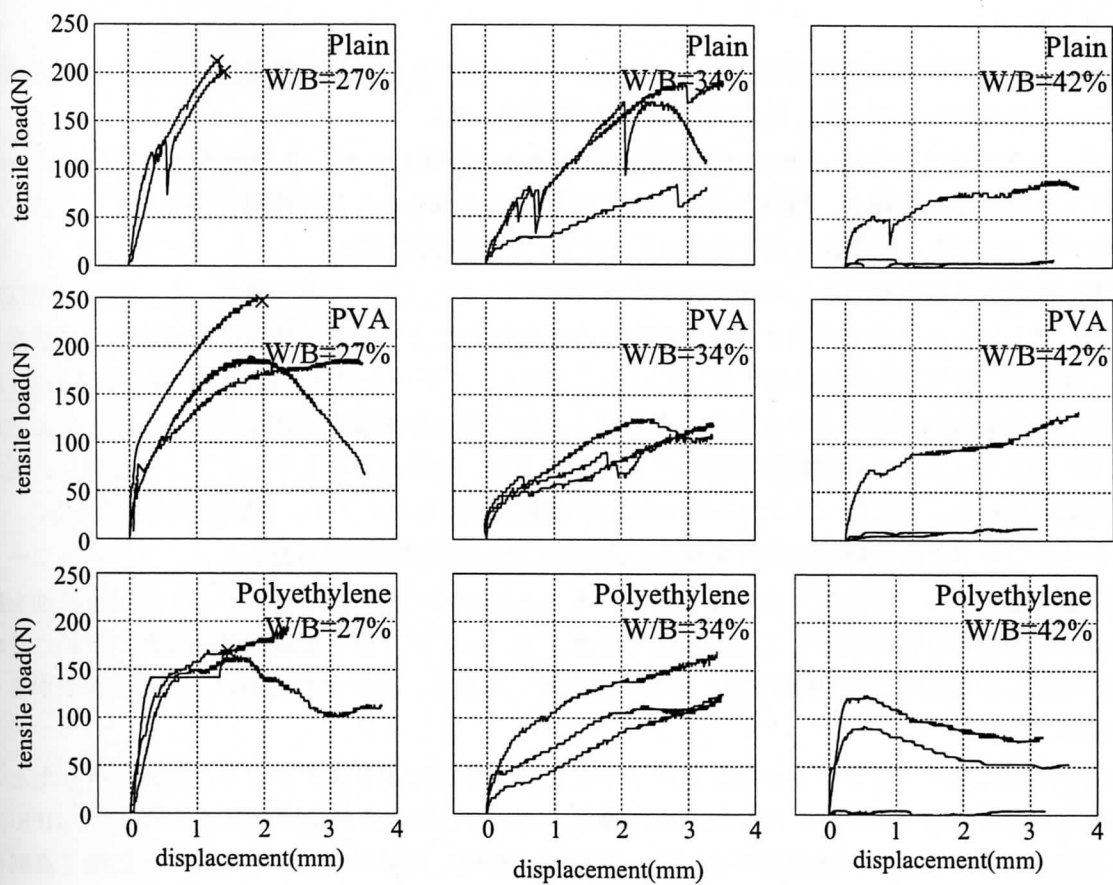


図2.5.3 スナッピング試験で得られた荷重-開口変位曲線  
×はスチールコードの破断

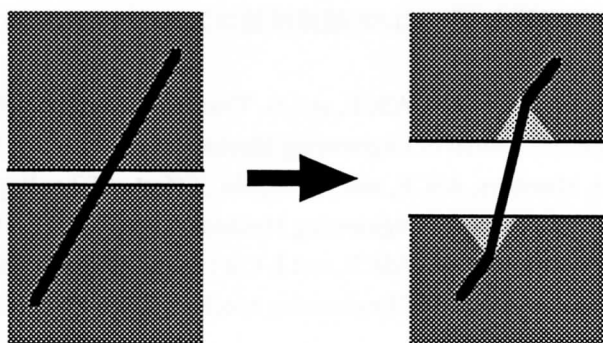


図2.5.4 スナッピングによるマトリックスの破砕

## 2.6 まとめ

ここでは、多段階補強型高靱性セメント系複合材料の第二段階の補強要素として取り上げているスチールコードを使用した各実験結果及び考察について記述した。

まず、スチールコードの引き抜け抵抗性能を実験的に評価したが、スチールコードをセメントマトリックスに埋め込んだ場合、最適なスチールコードの長さがあることが確認できた。又、セメントマトリックスによっても、引き抜け抵抗性能は変化することが確認できた。

スチールコードのみを混入したFRCCの曲げ試験を行ったところ、スチールコードの強度、剛性が高いために、マトリックスの方がスナッピングによる応力集中によってマトリックスは脆性的に破損した。しかしながら、靱性的な曲げ挙動を示していることから、スチールコードは合成繊維を混入したFRCCで形成される微細なひび割れより大きなメゾレベルのひび割れを補強するには有用であると考えられる。そこで、マトリックスに合成繊維を混入することにより、靱性的なマトリックスへと改善し、更なる靱性の向上を試みた。つまり、スチールコードと合成繊維によるハイブリッド型繊維補強である。

スチールコードと合成繊維の両方を混入したHFRCCの曲げ試験を行ったところ、スチールコードのみを混入した場合より、高強度・高靱性が得られることが確認できた。ハイブリッド型繊維補強を施すことによりひび割れは微細化することが確認できた。又、ハイブリッド型繊維補強はただ単にそれぞれの繊維の混入されたFRCCの性能を足し合わせただけではなく、足し合わせる以上の相乗効果があったことが確認できた。

角度を持ったスチールコードを配したひょうたん型試験体によりスナッピング試験を行ったところ、合成繊維を混入したマトリックスを使用した場合では、靱性的な引き抜け抵抗力を示した。HFRCCではこの靱性的なスナッピング効果がハイブリッド型繊維補強の相乗効果として靱性向上に働き高靱性挙動を得られる原因となったと思われる。

### [参考文献]

- 1) 福山洋, 佐藤幸博, 諏訪田晴彦: 高靱性セメント材料の構造物への利用に関する基礎的研究(その9 太径繊維を用いた高靱性セメント材料(ECC)の可能性に関する検討), 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 651-652, 1999. 9.
- 2) 日本コンクリート工学協会 編: JCI-SF 繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準, 技報堂, pp. 31-33, 1984.
- 3) C. K. Y. Leung, Associate Member, ASCE, and N. Ybanez: Pullout of Inclined Flexible Fiber in Cementitious Composite, Journal of Engineering Mechanics, pp. 239-246, 1997. 3.
- 4) M. Maalej, V. C. Li, Members, ASCE, and T. Hashida: Effect of Fiber Rupture on Tensile Properties of Short Fiber Composites, Journal of Engineering Mechanics, pp. 903-913, 1995. 8.
- 5) C. K. Y. Leung, Associate Member, ASCE, and J. Chi: Crack-Bridging Force in Random Ductile Fiber Brittle Matrix Composites, Journal of Engineering Mechanics, pp. 1315-1324, 1995. 12.

## 第3章 材料構成要素の影響

### 3.1 はじめに

第2章では、スチールコード及び合成繊維を共に混入したハイブリッド型繊維補強について基礎的なひび割れ抵抗機構を評価した。そこでは、ハイブリッド型繊維補強を施すことにより、ひび割れが微細化し、高強度・高靱性化が確認でき、ひび割れの微細化を実現できることが確認できた。

そこで本章では、第2章で取り上げたハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を更に実用的な材料にするために、水結合材比や合成繊維の物性による強度および靱性への影響を検討した。

### 3.2 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料に関するパラメトリックスタディー

#### 3.2.1 概要

ここでは、合成繊維と共にスチールコードを混入したHFRCCについて実験的検討を行った。HFRCCの実用化に向けての更なる検討として、マトリクスをモルタルに変えて、水結合材比及び繊維長をパラメータとした切り欠き梁の曲げ試験を行うと共に靱性能の定量的評価を行った。

#### 3.2.2 実験方法

##### 3.2.2.1 使用材料

本実験でマトリックスに使用した材料を表3.2.1に、繊維の詳細を表3.2.2に示す。ここで用いられたスチールコードは前章と同様であるため詳細は割愛するが、スチールコードの長さの影響を検討するため、8mm、16mm及び24mmについても実験を行った。本実験では合成繊維としてポリエチレン(PE)繊維とPVA繊維を使用した。

##### 3.2.2.2 調合

調合は、表3.2.2の通りである。本章ではより実用に近いようにセメントマトリックスではなくモルタルマトリックスとした。水結合材比は40、45及び50%を用意した。又、繊維混入率は何れのHFRCCにおいてもスチールコード及び合成繊維共に1.0vol.%の合計2.0vol.%とした。スチールコードの長さの影響についてはポリエチレン繊維とのハイブリッド化のみで検討を行った。以下に、検討を行ったパラメータを示す。

- ・水結合材比（40、45、50%）
- ・合成繊維の種類（ポリエチレン繊維、PVA繊維）
- ・合成繊維の長さ（ポリエチレン繊維：6mm及び15mm、PVA繊維：12mm及び18mm）
- ・スチールコードの長さ（32mm、24mm、16mm、8mm）
- ・スチールコードの混入率（1.00vol.%、0.75vol.%、0.50vol.%）

##### 3.2.2.3 練り混ぜ及び試験体作製方法

練り混ぜには真空オムニミキサー（最大容量10ℓ：千代田技研工業社製）を使用した。まず結合材を

表3.2.1 使用材料

	略号	比重	備考	製造元及び製品名
セメント	C	3.14	平均粒径：13 $\mu\text{m}$	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	平均粒径：0.15 $\mu\text{m}$	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ
7号珪砂	S	2.61	平均粒径：1.05-120 $\mu\text{m}$	ショーボンド社製
高性能AE減水剤	SP	1.1	主成分：芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリックFP200U

表3.2.2 使用材料

	比重	繊維長 (mm)	繊維径 ( $\mu\text{m}$ )	アスペクト 比	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
PE-6mm	0.97	6	12	500	2770	88
PE-15mm	0.97	15	12	1200	2770	88
PVA-12mm	1.30	12	37.5	320	1630	41.1
PVA-18mm	1.30	18	37.5	480	1630	41.1

投入して1分間空練りし、その後、水及び減水剤を投入し更に3分間練り混ぜた。更にスチールコードを投入して5分間練り混ぜた。

練り混ぜた後は、40×40×160mmの角柱試験体型枠に流し込み、突き棒でよく突き、気泡が含まれないように振動を与え、成形した。空気に解放した上面は、硬化途中に金こてで表面仕上げ（キャッピング）を施した。又、試験体は3体作製した。

### 3.2.2.4 養生方法

試験体は打ち込み後、養生室内（20℃、相対湿度90％以上）にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に各種試験を行った。又、試験前日に試験体の寸法及び重量の測定、並びに角柱試験体においては切り欠き設置を行った。

### 3.2.2.5 試験方法

切り欠き梁の曲げ試験には、40×40×160mmの角柱試験体を使用した。

曲げ試験では、角柱試験体中央部に深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッターにて設けたものを各シリーズ3体ずつ用いて、インストロン製万能試験機（最大能力2tf）により、変位制御にて速度0.2mm/minで載荷を行い、荷重-CMOD曲線を求めた。

表3.2.3 調合

Notation of group	Matrix				Volume content of fiber (vol.%)					Length of SC*							
	W/B (%)	S/B (%)	B (wt.%)		SP/B (%)	PE 6mm	PE 15mm	PVA 12mm	PVA 18mm		SC*						
			C	SF													
H40PE6A	40	40	80	20	2.0	1.0	-	-	-	1.00	32mm						
H40PE6B						1.0	-	-	-	0.75	32mm						
H40PE6C						1.0	-	-	-	0.50	32mm						
H40PE6D						1.0	-	-	-	1.00	24mm						
H40PE6E						1.0	-	-	-	1.00	16mm						
H40PE6F						1.0	-	-	-	1.00	8mm						
H40PE15						-	1.0	-	-	1.00	32mm						
H40PVA12						-	-	1.0	-	1.00	32mm						
H45PE6	45				40	80	20	1.5	1.0	-	-	-	1.00	32mm			
H45PE15									-	1.0	-	-	1.00	32mm			
H45PVA12									-	-	1.0	-	1.00	32mm			
H45PVA18									-	-	-	1.0	1.00	32mm			
H50PE6	50							40	80	20	1.0	1.0	-	-	-	1.00	32mm
H50PE15												-	1.0	-	-	1.00	32mm
H50PVA12												-	-	1.0	-	1.00	32mm

### 3.2.3 実験結果及び考察

#### 3.2.3.1. 荷重-CMOD曲線

図3.2.1～6に3点曲げ試験で得られたそれぞれのシリーズの3本の荷重-CMOD関係の平均曲線を示す。図3.2.1を見ると、水結合材比45%の場合、合成繊維の物性の影響は顕著には見られなかった。しかしながら、図3.2.2及び図3.2.3を見ると、ポリエチレン繊維を使用したHFRCCでは水結合材比の影響が確認できる。ここでは水結合材比が小さくなるに従い、最大荷重が高くなることが確認できる。特に、H40PE6Aでは高い最大荷重を示している。更に前章でアラミド繊維の混入率を増加させた場合に見られたような、最大荷重は増加するものの最大荷重以降の靱性は低下する現象が見られないことを特に強調しておきたい。一方、H40PE6Aより長い15mmのポリエチレン繊維を使用したH40PE15では、長い合成繊維を使用しているにも関わらず低い最大荷重を示している。これは繊維が長いために十分な分数が得られなかったことが主なる理由と考えられる。また、繊維が長すぎて破断する繊維が多くなった結果架橋力が低下した影響と考えられる。又、図3.2.4を見ると、PVAを使用したHFRCCでは水結合材比の影響ほとんど見られなかった。これはPVA繊維はポリエチレン繊維よりも引張強度が低いため、破断したためと考えられる。そのためPVA繊維とのハイブリッド化ではここで使用した水結合材比より高い水結合材比のほうが適していると考えられ、更なる検討が必要である。



図3.2.5及び図3.2.6における実験はHFRCCのワーカビリティを向上させる目的で行った。ワーカビリティを評価する方法としては、フロー値を測定した。表3.2.4に各シリーズのフロー値を示す。ここで基準となるシリーズであるH40PE6Aのフロー値は141.5mmと小さく、多段階型補強により今後、鉄筋を配された構造物への打設を考慮した場合、その作業性は悪いものと考えられる。そこで短いスチールコードを混入することと、スチールコードの混入率を下げることによりワーカビリティの向上を検討した。スチールコードの混入率を0.50vol.%としたH40PE6Cとスチールコードの長さを8mmとしたH40PE6Fのフロー値はそれぞれ147.0mmと161.5mmであった。スチールコードの長さを8mmと短くすることによりフロー値は増加したが、図3.2.6を見るとその曲げ性能は大きく低下していることがわかる。一方、スチールコードの混入率を低下させてワーカビリティの向上を図ったH40PE6Cでは、フロー値はそれほど向上しなかったがH45PE6と同等の曲げ性能を示した。FRCCはセメント系材料に繊維を加えるためコストが大幅に上昇してしまうので、実用性の観点からすれば繊維の混入量は少ない方が好ましい。この意味ではスチールコードの混入量を低下させる方法は有効であると考えられる。

表3.2.4 各シリーズのフロー値 (mm)

H40PE6A	141.5
H40PE6B	138.5
H40PE6C	147.0
H40PE6D	142.0
H40PE6E	161.0
H40PE6F	161.5
H40PE15	132.5
H40PVA12	138.5
H45PE6	140.0
H45PE15	136.5
H45PVA12	143.5
H45PVA18	129.0
H50PE6	141.0
H50PE15	130.0
H50PVA12	137.0

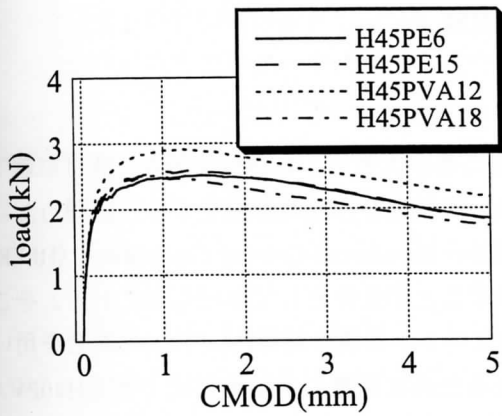


図3.2.1 合成繊維の種類の影響  
(W/B=45%)

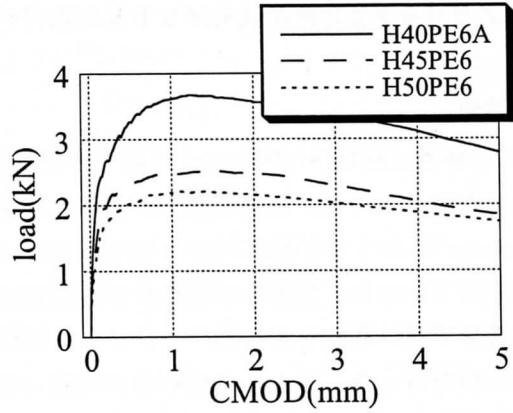


図3.2.2 水結合材比の影響  
(PE:6mm)

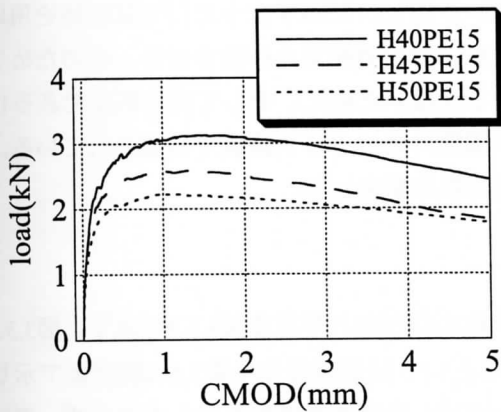


図3.2.3 水結合材比の影響  
(PE:15mm)

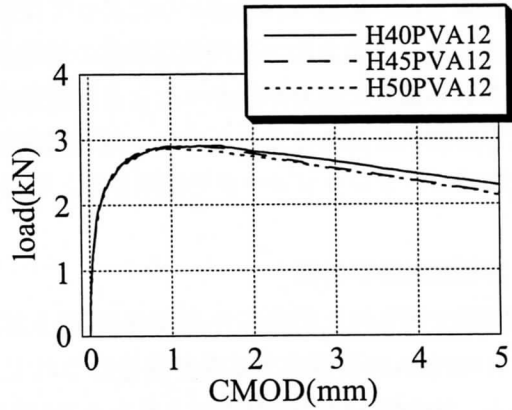


図3.2.4 水結合材比の影響  
(PVA:12mm)

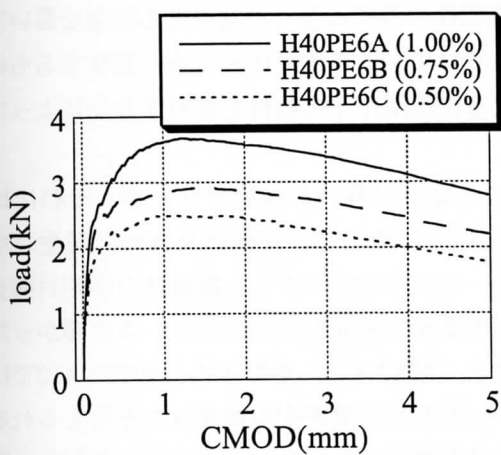


図3.2.5 スチールコードの混入率の影響

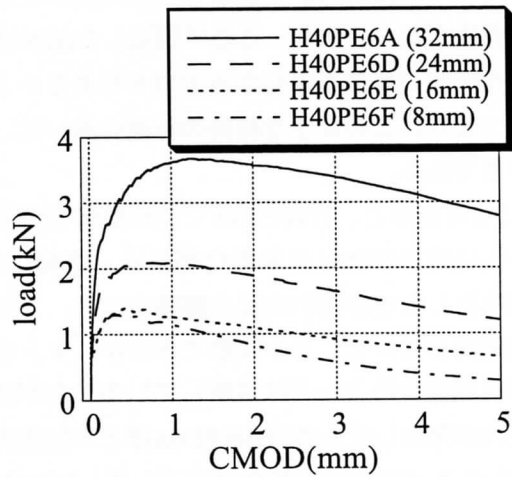


図3.2.6 スチールコードの長さの影響

### 3.3 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の引張性能

#### 3.3.1 概要

FRCCの特徴は微細ひび割れによる靱性の向上に因るところが大きい。しかしながら、曲げ試験で微細ひび割れが発生しても、直接引張力が作用した場合において微細ひび割れが発生するとは限らない。更に、Naaman<sup>1)</sup>によって定義されているHigh Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC)は、引張力下において微細ひび割れ及び疑似歪硬化を示すことが条件として挙げられている。そこで本節では前節で高い性能を示したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料H40PE6Aの調合を用いて直接引張試験を行った。また、合成繊維の種類の影響を見るために同様の水結合材比であるH40PVA12も実験シリーズに加えた。

#### 3.3.2 実験方法

引張試験では、佐藤<sup>2)</sup>及び福山<sup>3)</sup>らによって提案されている図3.3.1に示すような円柱試験体を用いる方法を採用した。この方法では円柱試験体の両端部を直接掴んで引張荷重を作用させる。そのためチャックで掴まれる部分に圧力が掛かったときに試験体を破損させないために、そして測定区間である100mmの間にひび割れを発生させるために、円柱試験体の上下端部外周はガラス繊維で補強されている。変位の測定にはコンプレッソメータを使用して、引張応力-歪関係を測定した。

#### 3.3.3 実験結果及び考察

引張試験で得られた引張応力-歪関係を図3.3.2に、試験体のひび割れ写真を図3.3.3に示す。図3.3.2を見ると、H40PE6Aの引張応力は歪が進むにつれて上昇するという疑似歪硬化を歪1.5%程度まで示している。一方、H40PVA12はH40PE6Aよりも小さい0.5~0.8%までしか疑似歪硬化を示しておらず、更に最大応力以降の靱性能も低いものとなっている。Liなどによって提案されている合成繊維を使用したECCでは6%程度まで疑似歪硬化を示すものが開発されているが、これはダンベル型の薄板試験体によるものである。従って、用いられた試験体形状の違いによる繊維補強率の有効性の相違が大きく、直接比較することは意味がない。また、ここで製造したHFRCCは、高靱性のみではなく高強度にも特徴を置いているため、引張時の疑似歪硬化がECCのそれより小さくなっている、有用性に劣る事を意味するものではない。つまり、このような材料の特徴の違いは、どのような箇所にその材料を使用するかによって選ばれるべきである。

図3.3.3を見ると、H40PE6Aでは試験体全体に複数の微細ひび割れが確認できたが、それに比べてH40PVA12はひび割れの局所化が早く、微細ひび割れが発生したものの試験体全体には発生しなかった。局所化したひび割れ内部を観察すると、スチールコード及びポリエチレン繊維はひび割れ面を破断せずに架橋していることが観察できたが、マトリックス強度及び付着特性とのバランスが悪かったために、PVA繊維のほとんどは破断していることが確認できた(図3.3.4)。そのため、H40PVA12では微細ひび割れが発生したもののH40PE6Aほどの架橋力がなかったために局所化が早まったと考えられる。いずれにしても本実験の結論的結果として、H40PE6Aは直接引張力の下においても微細ひび割れの発生と疑似歪硬化を示したことから、HPFRCCとして定義できるほどの高い引張性能を示すことが確認された。

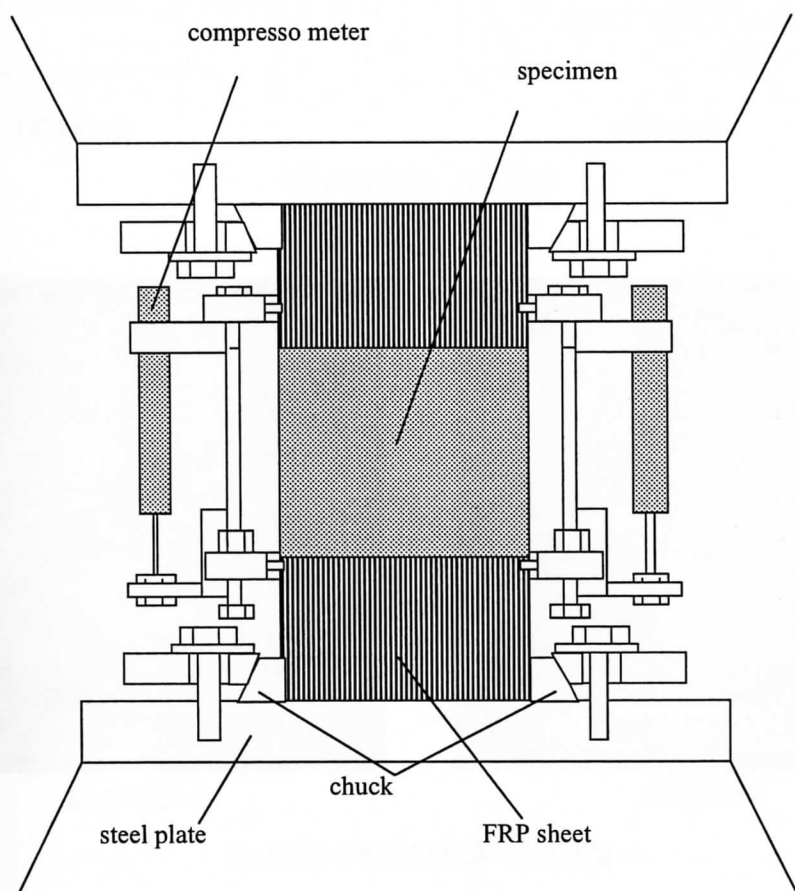


図3.3.1 引張試験概要図

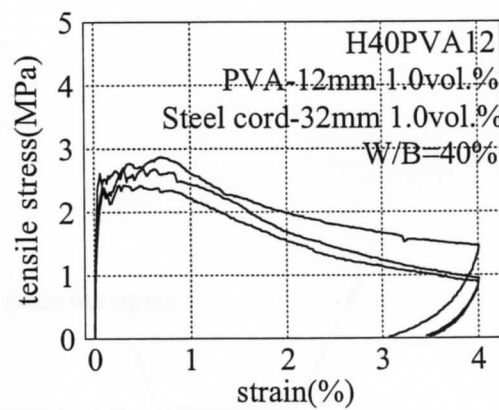
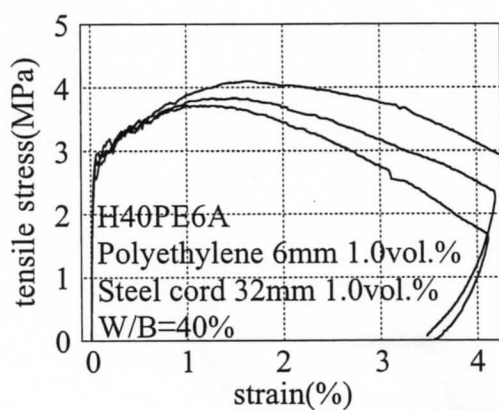
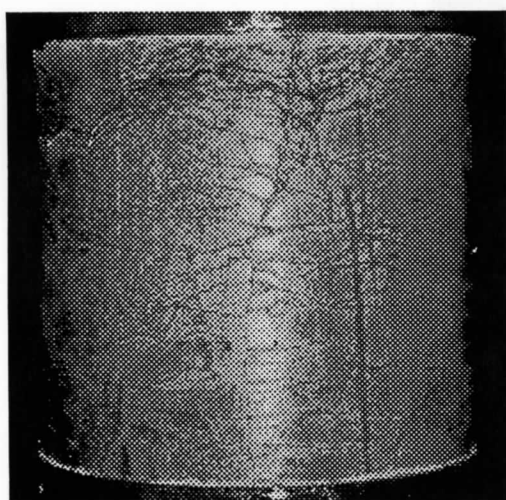
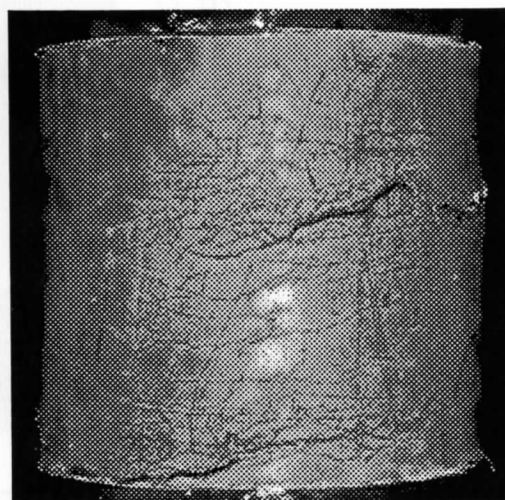


図3.3.2 引張応力-歪



H40PE6A



H40PVA12

図3.3.3 引張試験体ひび割れ図

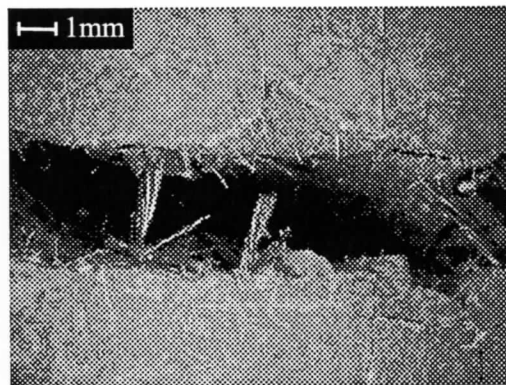
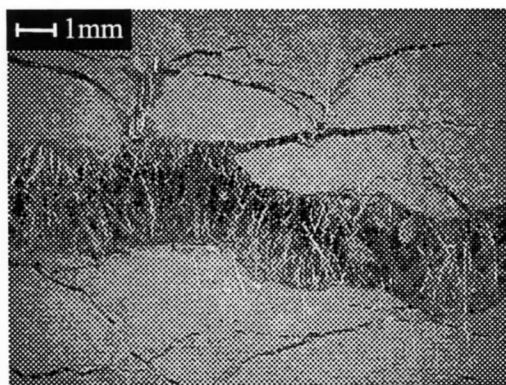


図3.3.4 引張試験体ひび割れ内の繊維架橋状況

### 3.4. まとめ

本章では、より実用に近い材料を使用してハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料について実験的検討を行った。

今回提案したHFRCCの調合では、短いポリエチレン繊維を混入したHFRCCが高い曲げ性能を示した。一方、複合体の強度が高いため、PVA繊維を使用したHFRCCでは破断する繊維が多く、高い曲げ性能を発現できなかったものと考えられる。又、コストを考慮するとスチールコードの混入量を低下させることは有効であり、ワーカビリティの向上にも若干有効であることが確認された。

直接引張試験では、ポリエチレン繊維を使用したHFRCCで約1.5%までの疑似歪硬化を示した。更に、試験体全体に微細ひび割れを示したことから、HPFRCCとして定義できるほどの高い性能を持っていることが確認できた。

#### [参考文献]

- 1) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HFRCC," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC2), 1996, pp.1-23.
- 2) Sato, Y., Fukuyama, H. and Suwada, H., "A Proposal of Tension-compression Cyclic Loading Test Method for Ductile Cementitious Composite Materials," J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.539, Jan., 2001, pp.7-12, (in Japanese).
- 3) Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H., "Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements, Composite and Hybrid Structures," Proceedings of 6th ASCCS Conference, ASCCS-6 Secretariat, Mar., 2000, pp.969-976.

## 第4章 結び

第Ⅰ部では、二種類の補強材、つまり、高性能合成繊維に加えてスチールコードを使用したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料について高強度・高靱性という2つの要求性能を満足し得る材料開発に関する実験的検討を行った。

第2章では、ハイブリッド型繊維補強を施すことにより、スチールコードのみを混入したときに見られた脆性的で大きなマトリックスのひび割れは減少して、微細なひび割れが形成された。その結果、スチールコード混入FRCCにおいて大きなひび割れが形成されつつも靱性的な曲げ挙動を示したことから、合成繊維混入により高靱性化されたマトリックスに埋設されることにより、始めてスチールコードは十分にその能力を発揮し、メゾレベルのひび割れに有効に働くことが確認できた。即ち、合成繊維のみ及びスチールコードのみのFRCCと比較してハイブリッド型FRCCは曲げ強度・靱性ともに高い性能を示した。特に、ポリエチレン繊維とスチールコードとのハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料では、一軸引張応力下においても微細な複数ひび割れ及び1.5%程度までの疑似歪硬化を示し、高性能FRCCとして位置付けられるほどの高い性能を示した。Liらによって開発されたECCほどの大きな歪までの変形能は示さないものの剛性と強度は高く、構造用材料として多様な利用方法が期待される。

第3章では、ハイブリッド型FRCCを構成する要素材料を適切に選定するためのデータを得、しかも各々の要素材料が効果を発揮するメカニズムを更に解明するために、水結合材比や合成繊維の物性によるハイブリッド型FRCCの強度および靱性への影響を検討した。その結果、最も大きな影響要因としてはスチールコードの長さを32mmから8mmへと順に半分の長さに短くすると、靱性が大きく低減することが分かった。一方、32mmの長さの混入量を1vol.%から0.50vol.%に減じても、強度は若干減少するものの安定した靱性挙動を得ることが明らかとなった。

合成繊維の選定に当たっては、マトリックスの剛性即ち水結合材比との組み合わせにも十分配慮する必要があることも判明した。



## 第II部

# 鉄筋コンクリート部材要素のひび割れ進展挙動と 力学的特性に関する実験的検討

---

## 第5章 序

第Ⅰ部で示されたように、本研究で対象としているハイブリッド型セメント系複合材料は、細かいひび割れが無数に生じることで比較的大きな変形までひずみ硬化挙動を示す高靱性を実現することができる。そこでこのような新しいセメント系複合材料を構造部材として用いる基礎的検討を行う。プレーンコンクリートは引張強度が低く、乾燥収縮などで初期ひび割れも入り易い。そこで鉄筋コンクリート造の柱や梁部材が曲げ応力の作用を受けた場合に、引張応力に対しては鉄筋で抵抗することが前提とされている。

それに対して新たに開発された高靱性セメント系複合材料は、従来は考えられなかった程度の引張強度と靱性を有するので、鉄筋と一体となった場合にも従来の鉄筋コンクリート造部材とは異なる性能を有することが期待される。

そこで第Ⅱ部では構造部材の最も基本的な単位要素の試験としてセメント系複合材料で作られた角柱に埋設された一本の異形鉄筋の両引き試験ならびに鉄筋 4 本を隅角部に配することで曲げひび割れ発生・進展を抑えた梁の曲げせん断試験を実施した。そして、荷重－変形関係の特性変化を調べると共に X 線透過撮影法を用いてひび割れの発生・進展過程を詳細に観察し、力学的抵抗メカニズムへの構成材料の影響について考察した。

## 第6章 異形鉄筋周りのひび割れ進展挙動と付着特性 (Part I : 高靱性複合材料)

### 6.1 はじめに

本章では、高靱性セメント系複合材料（以下、FRCC と略称する）の構造部材への適用に関する研究の基礎的な段階として、FRCC を用いた構造部材要素の基礎的力学性状について実験的検討を行う。基礎的力学性状としては、曲げ応力を受ける部材の引張側鉄筋周りの挙動に注目し、従来のセメント系複合材料に比べて大幅に性能が向上した FRCC の引張特性が及ぼす影響について検討を行う。実験は、FRCC に埋め込まれた鉄筋の両引き試験によって行う。

コンクリートに埋め込まれた鉄筋が引張を受ける場合、ひび割れ発生過程で、あるいはひび割れが発生した後も、そのひび割れ間ではコンクリートは引張力を負担する。その結果、鉄筋が降伏するまでの過程で鉄筋単体に引張力を与えた場合よりも、より高い抵抗力を示す。この現象をテンションスティフニング効果<sup>2)</sup>と呼ぶが、これは鉄筋とコンクリートの付着作用とコンクリートの引張抵抗力によって生じるものである。FRCC の場合、引張抵抗力が更に大きくなり、鉄筋の歪に追従して荷重を維持するという特徴があることから、鉄筋のテンションスティフニング効果に与える影響について検討するものであり、FRCC と鉄筋の相互作用に関するメカニズムを明らかにする事を目的としている。

本章における研究は、FRCC を用いた構造部材を設計する際に重要な情報となるものであり、FRCC をどのような部材に適用すべきかという問題に対して、その道筋を示すものである。

6.2 X線透過撮影による鉄筋周囲の微細ひび割れの検出

6.2.1 実験概要

本実験は X 線透過撮影<sup>3)</sup>により、鉄筋の周囲に発生する微細ひび割れを検出することで、引張力を受ける鉄筋及び FRCC における相互作用のメカニズムを解明することを目的としている。

6.2.2 使用材料

表 6.2.1 に本実験に使用した材料を、また使用した繊維とその物性を表 6.2.2 に、使用した鉄筋の物性を表 6.2.3 に示す。

表 6.2.1 使用材料

	略号	比重	主成分	製造元または販売元 製品名
セメント	C	3.14	—	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	—	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ 940U
珪砂	S	2.61	—	ショーボンド建設社 珪砂 8 号
高性能 AE 減水剤	SP	1.1	芳香族アミノスルホン 酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリック FP200U
増粘剤	V	1.2~1.3	水溶性セルロース エーテル	信越化学工業社製 メトローズ 90SH-30000
消泡剤	-	0.40	ポリエーテル	サンノプロ株式会社製 SN デフォーマー 14-HP

表 6.2.2 使用した繊維と物性

No	繊維種類	直径 ( $\mu$ m)	繊維長さ (Lf)(mm)	比重	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	集束の 状態	製造元
PE	ポリエチレン	12	15	0.97	2770	88	未集束	東洋紡社
PVAa	PVA-R	37	6	1.3	1620	42	集束	クラレ社
PVAb	PVA-R	〃	12	〃	〃	〃	〃	〃

表 6.2.3 使用した鉄筋の物性

寸法	規格	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D16	JIS G3112 SD345	404	551

6.2.3 調合

本実験に使用した調合を表 6.3.4 に示す。予備的検討段階で高靱性能を得た、PVA<sub>b</sub>-E2、PVA<sub>c</sub>-E2 及び PE<sub>b</sub>-B5 の 3 種類を採用した。

表 6.3.4 調合

No	繊維	V <sub>f</sub> (vol.%)	W/B* (wt.%)	S/B (wt.%)	SP/B (wt.%)	V/(W+SP) (wt.%)
PVA <sub>a</sub>	PVA <sub>a</sub>	2.0	62	40	-	1.4
PVA <sub>b</sub>	PVA <sub>b</sub>	2.0	62	40	-	1.4
PE	PE	1.5	45	40	1.5	0.6

[注] B=C+SF

6.2.4 試験体概要及び試験体作製方法

図 6.2.1 に試験体概要を示す。加力部分の降伏を防ぐために、両端部は 3 本の鉄筋を溶接したものを用意した。このとき、鉄筋が 1 本となる区間は 400mm となるように加工した。また FRCC への引張力の伝達及び端部割裂破壊の抑制のためにスパイラル補強を施した。スパイラル筋は直径 4mm のなまし鉄線を用いて作製した。銅パイプは直径 5mm のものを用い、試験体内で安定させるために端部を開き、定着させた。

また、最初のひび割れを、コントロールされた位置に発生させる目的で、試験体中央に深さ 5mm の切り欠きを試験体両側に設けるために、厚さ 1mm のスチレンボードを予め型枠に配置した。さらに、試験体には銅パイプを介して予め直径 3mm の真鍮棒を埋め込み、FRCC の硬化後引抜き、造影剤用孔となるようにした。

練り混ぜはオムニミキサー(容量：10ℓ)を用い、1 分間の空練りの後、水及び高性能 AE 減水剤を投入し 3 分間本練りして、更に繊維を投入して 5 分間練り混ぜた。これを予め鉄筋などを配置した型枠に流し込み成型し、試験体を作製した。このとき、気泡が含まれないよう突き棒で突き、バイブレータで十分に振動を与えた。

練り混ぜは各調合から 2 バッチずつ行い、1 バッチにつき試験体を一体作製した。

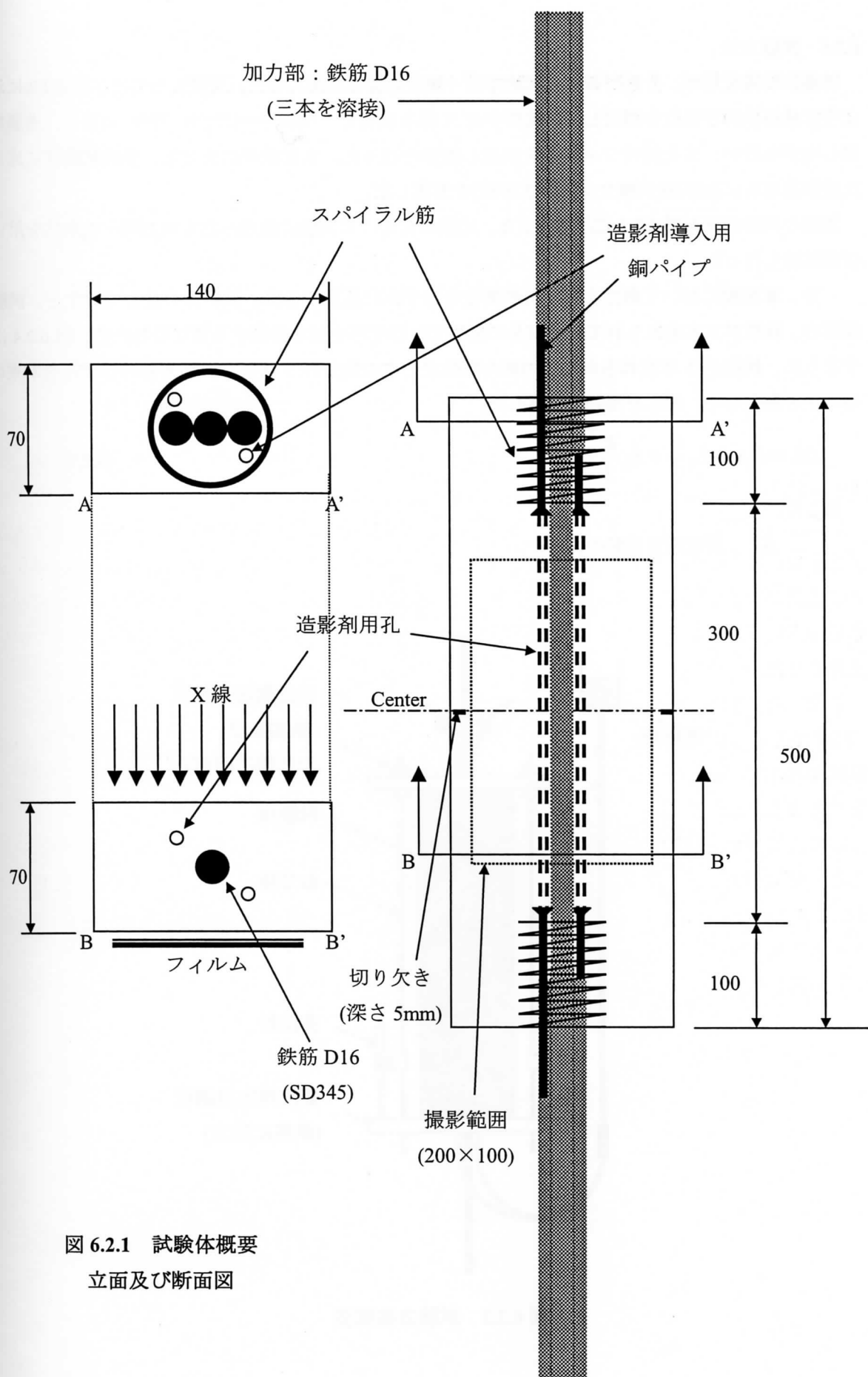


図 6.2.1 試験体概要  
立面及び断面図

6.2.5 実験方法

万能試験機を用い、荷重制御にて試験体に一軸引張荷重を加力した。変位としては、図 6.2.2 に示すように鉄筋の伸び変位を測定した。載荷中は X 線を投射し、モニターにてひび割れの発生、進展を観察しながら行い、また随時フィルムを設置し撮影を行った。また載荷に先立ち、予め試験体に施された造影剤用孔に造影剤(炭酸セシウム水溶液)を充填した。

実際の試験状況を図 6.2.3 に示す。また、比較のために本実験に使用したものと同一の鉄筋を用いた引張試験も行った。

一方、本実験において測定された引張変位をひずみに換算する際、試験体の長さで除すと、試験体端部の、鉄筋が 3 本束ねられている部分の影響で、ひずみを過小評価する事になるため、図 6.2.4 に示すように、鉄筋が 3 本束ねられた加力部の剛性を一本の部分の 3 倍とし、加力部のひずみを本来の 3 分の 1 と仮定して、次式を用いて概算した。

$$\Delta L = L_1 \epsilon + L_2 \frac{\epsilon}{3} + L_3 \frac{\epsilon}{3}$$

(6.2.1)

ここに、

$\Delta L$  : 変位測定区間の伸び

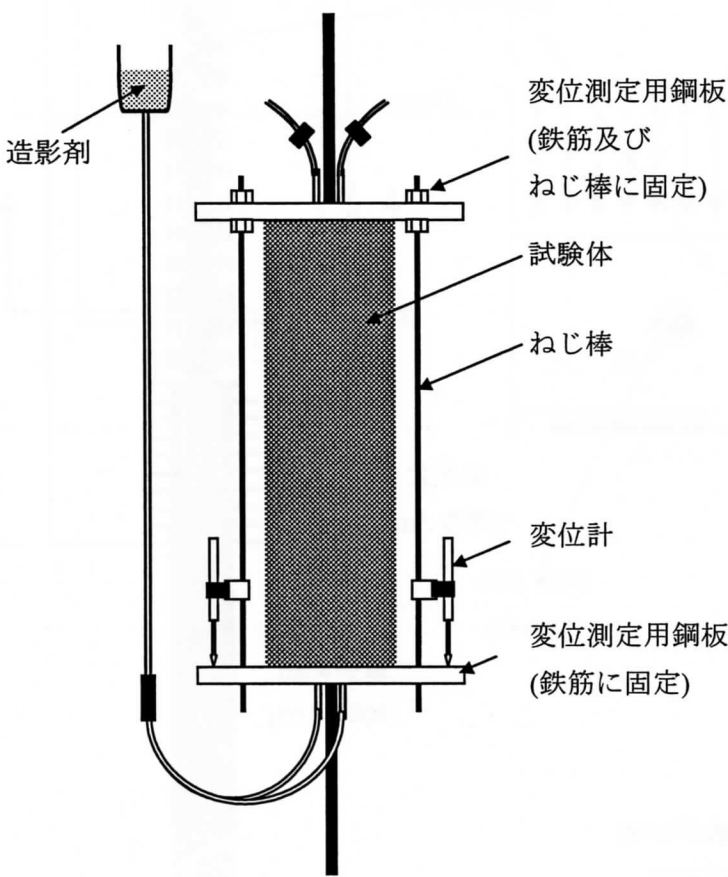


図 6.2.2 試験方法概要





図 6.2.3 試験状況

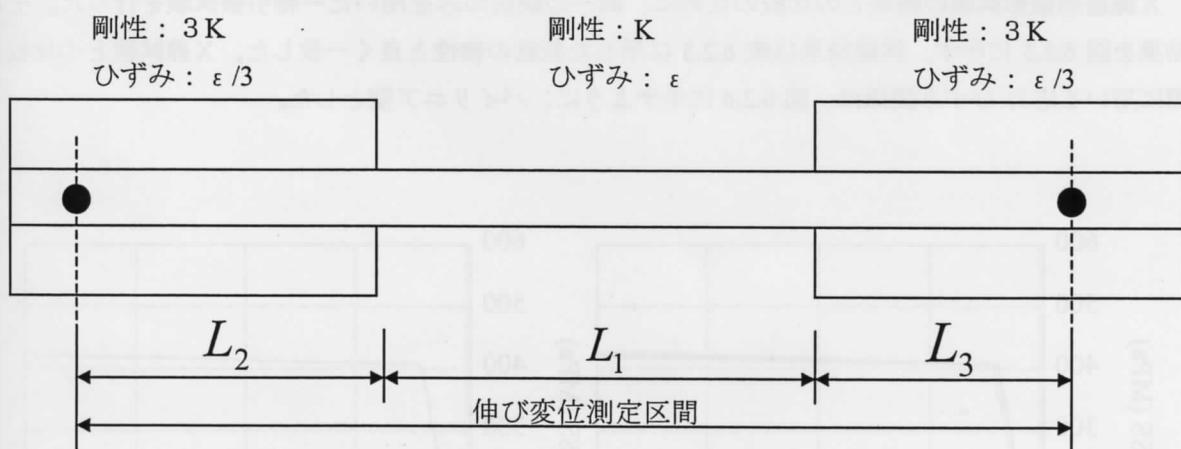


図 6.2.4 ひずみの算出

6.2.6 フレッシュ性状

FRCC それぞれのフレッシュ性状を表 6.2.5 に示す。各試験体の呼び名は[調合名-バッチ]とした。すなわち、PVAa の 1 バッチ目は[PVAa-1]とした。以下実験結果及び考察においてもこの表記法とする。ファイバーボールの有無に関しては打ち込みの際、その都度手で確かめた。

表 6.2.5 フレッシュ性状

No	空気量 (%)	テーブルフロー (mm)	ファイバーボール
PVAa-1	8.8	180/185	無
PVAa-2	8.8	175/180	〃
PVAb-1	10.5	158/154	〃
PVAb-2	12.5	150/150	〃
PE-1	4.1	143/145	〃
PE-2	3.8	143/145	〃

表 6.2.5 を見ると、同一シリーズにおいては概ね安定したフレッシュ性状が得られている。テーブルフローから分かるように、流動性については PVAa のシリーズが最も優れ、ついで PVAb、PE の順となっている。

6.2.7 鉄筋の一軸引張試験

X線透過撮影試験の結果との比較のために、同一の鉄筋のみを用いた一軸引張試験を行った。その結果を図 6.2.5 に示す。試験結果は表 6.2.3 に示した鉄筋の物性と良く一致した。X線試験との比較の際に用いる応力-ひずみ関係は、図 6.2.6 に示すように、バイリニア型とした。

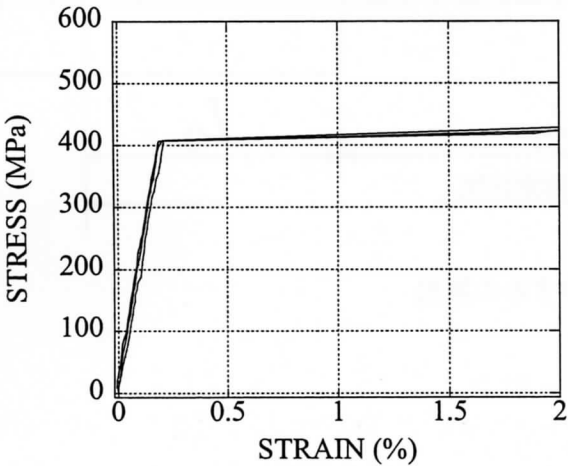


図 6.2.5 鉄筋の一軸引張試験結果

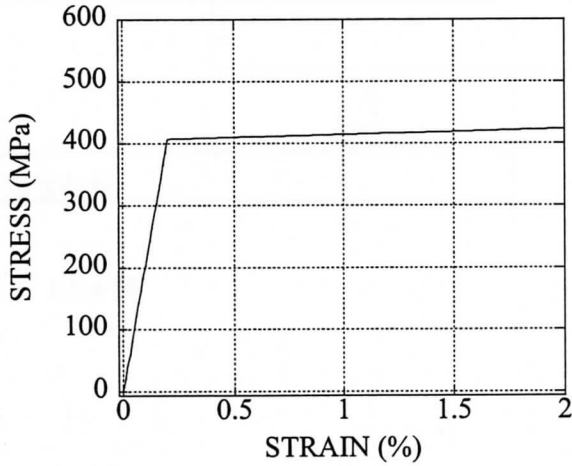


図 6.2.6 鉄筋の応力-ひずみ関係

## 6.2.8 実験結果

図 6.2.7～24 に各シリーズに関する材料実験の結果、X 線透過撮影試験から得られた引張応力-ひずみ曲線、試験後の試験体のひび割れ状況、及び鉄筋周囲のひび割れ状況を示す。試験後のひび割れ状況を示した図において、試験体に施された朱線は、試験体中央部(切り欠きの位置)及びスパイラル筋の境界を、それぞれ示している。

試験後の試験体のひび割れ状況は、ひび割れを明確にするために湿らした上で撮影し、更に画像処理を施した。また、ひび割れが微細で詳細を捕らえるのが困難であったものに関しては、接写して細部まで明確に撮影した写真を繋ぎ合わせた。X 線透過撮影試験は、歪 1%まで行ったが、PVAa-2 ではひび割れが局所化し造影剤が漏洩したので 0.60%で終了した。X 線写真の撮影は、モニターにて第 1 ひび割れが確認できた時点で行い、それ以降は降伏点付近、歪 0.60%付近及び 1.0%付近にて更に行い、ひび割れの発生及び進展状況を確認した。写真の撮影中や、モニターによる試験体観察時は随時試験機をホールドしたが、降伏点を越えた後はホールドが技術的に難しく、多少応力の落ち込みが生じている。引張応力-ひずみ曲線において所々応力の落ち込みが確認できるのはこのためである。

材料試験の結果をみると、いずれも複数ひび割れ挙動が確認でき、高靱性を得ていることが分かる。また多少のばらつきはあるものの、同一の調合ではバッチに関係なく、ほぼ同様の傾向が得られている。

引張応力-ひずみ曲線において、鉄筋のみの結果と比較すると、全ての試験体において初期剛性の向上及び応力の上昇が確認でき、顕著なテンションステイフニング効果が確認できる。また、各シリーズにおいて比較すると、水セメント比が低く FRCC 自体の剛性が高い PE のシリーズが、引張応力-ひずみ曲線における初期剛性の向上において最も顕著であることが分かる。更に、材料試験において最も高い応力を得た PE シリーズが、引張応力-ひずみ曲線においても応力の上昇に最も優れていた。

試験後のひび割れ状況を見ると、PVAa-1、PVAb-2 及び PE-1 では、PVAa-1 において若干の局所化が見られるが、顕著な局所化は生じず、FRCC が鉄筋の変形に追従したことが分かる。これに対し、PVAa-2、PVAb-1 及び PE-2 ではひび割れの局所化が見られる。PVAa-2 は局所化が断面全体に広がり、ひび割れ開口も非常に大きなものになっているのに対し、PVAb-1 及び PE-2 では局所化ひび割れは断面全体に広がらず、局所化したひび割れの先端にて多数の微細ひび割れへと置き換わっている。一方ひび割れの局所化が生じなかった PVAa-1、PVAb-2 及び PE-1 で、複数ひび割れはいずれの試験体にも見られ、PVAb-2 では特に顕著な複数ひび割れが確認できた。PVA-b2 の複数ひび割れは非常に密集しており、それぞれのひび割れの開口も小さく、またその発生箇所は試験体中央部に集中している。PE-1 の複数ひび割れはひび割れの間隔がやや広く、発生箇所も試験体全体にわたっている。また、個々のひび割れの開口は、PVAb-2 に比べてやや大きいことが分かる。一方 PVAa-1 の複数ひび割れはスパイラル筋の端部付近に集中しており、ひび割れの開口も PVAb-2 と比較してやや大きい。このひび割れ開口変位の大小に関する特徴は、第 4 章において行った 4 点曲げ試験におけるひび割れ開口の大小の特徴とほぼ一致しており、付着力の高い PVA-R において 12mm という比較的長い繊維を用いると、架橋力の上昇が小さい COD においてされるため、小さい COD の段階で他のひび割れの発生を促すものと考えられる。

それぞれの X 線写真を見ると、いずれの試験体も、はじめノッチ部分に第 1 ひび割れが発生し、その後新たなひび割れの発生及びひび割れの進展が確認できる。いずれの試験体においても、ひび割れは鉄筋の節付近からコーン状に進展する、いわゆる「Goto クラック<sup>4)</sup>」である。このクラックが進展

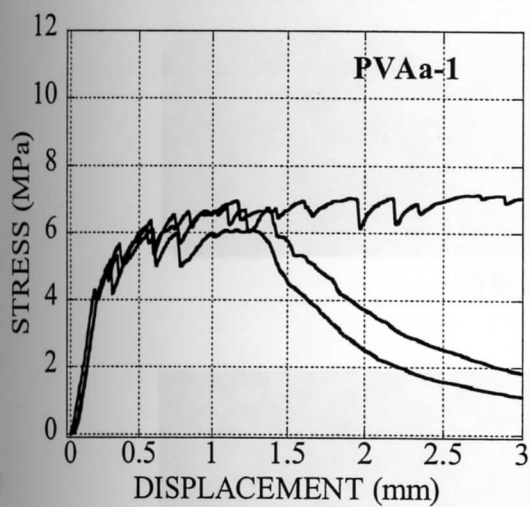
し、表面に達して横ひび割れとなるのは従来のセメント系材料と同様であるが、FRCC の場合、ひび割れを繊維が架橋しある開口変位において進展が止まるため、従来のセメント系材料のような鉄筋の露出は小さい変位では見られない。更に繊維による応力の伝達により、新たなひび割れの発生が促され、比較的狭い間隔で横ひび割れが広範囲に現れていることが確認できる。また、横ひび割れの周辺には微細なひび割れが追従して発生し、複数ひび割れ挙動を生じている様子が見て取れる。これらの写真は 3 次元に展開するひび割れを 2 次元に投影したものであるため、それぞれのひび割れの開口変位を厳密に測定することは難しいが、試験後のひび割れ状況写真と比較すると、X 線写真で全体的に白くなっている部分が必ずしも開口の大きいひび割れの発生を示しているのではなく、微細なひび割れが多数発生しているためであることが見て取れる。

例えば PVA<sub>b</sub>-2 における、図 6.2.17(c)、図 6.2.18 の(d)及び(e)を見ると、(c)において写真やや右側での変形が顕著となり始め、ひび割れが表面に達しているが、鉄筋のひずみに追従して更に微細ひび割れが発生し、(e)において一帯がぼやけたように薄く白くなっている。また図 6.2.16(c)において局所化したひび割れは見られないことから、広範囲において FRCC がひずみ、変形に耐えたことを示していると考えられる。

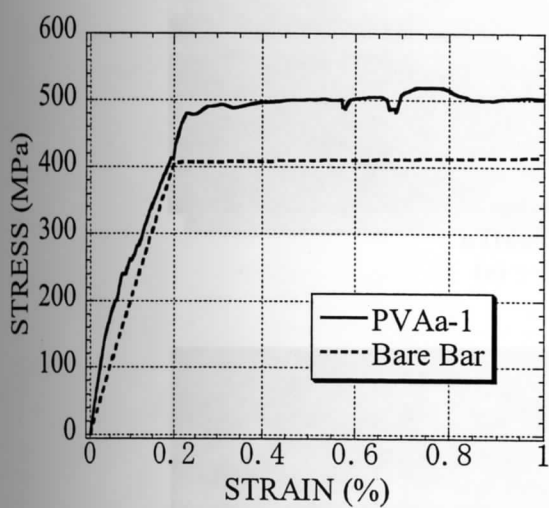
一方、PVA<sub>b</sub>-2 では試験体の中央部分に変形が集中し、上記のような集中した複数ひび割れが確認できたのに対し、PE-1 で図 6.2.20(c)、図 6.2.21(d)及び(e)までを見ると、広範囲においてコーン状のクラックの発生が確認され、ひずみの集中は無かったものと考えられる。このように、FRCC のひずみはある 1 点において顕著にならず、全体的に均一にひずむ特性であり、ここに示した結果は広範囲にわたる鉄筋の塑性化の可能性を示す重要なデータであると考えられる。

一方、ひび割れの発生状態を全体として捉えて比較した場合、水結合材比の比較的低い PE シリーズは加力軸に対して垂直方向にひび割れが進展しており、平行なひび割れが多く発生していることから、FRCC への引張力の伝達が極めて均一に行われたことが確認できる。これは繊維の架橋により、ひび割れ発生後においても引張り力が伝達されるためであると考えられる。一方、水結合材比の比較的高い PVA のシリーズでは、ひび割れの方が PE シリーズに比べてややランダムであり、引張応力の伝達がやや不均一であった事が分かる。これは水結合材比が高く、マトリックスの弾性係数が低かった事や、マトリックスの粘性が低いために、繊維の分散において不利であったため、材料の均質さにおいて多少のばらつきがあった事が原因であると考えられる。すなわち、弾性係数が高く、剛な PE シリーズでは応力が複合材料に均一に伝達され、更に均質な材料を実現できているため、材料のひずみも均一に発現し、このような結果を得たということである。

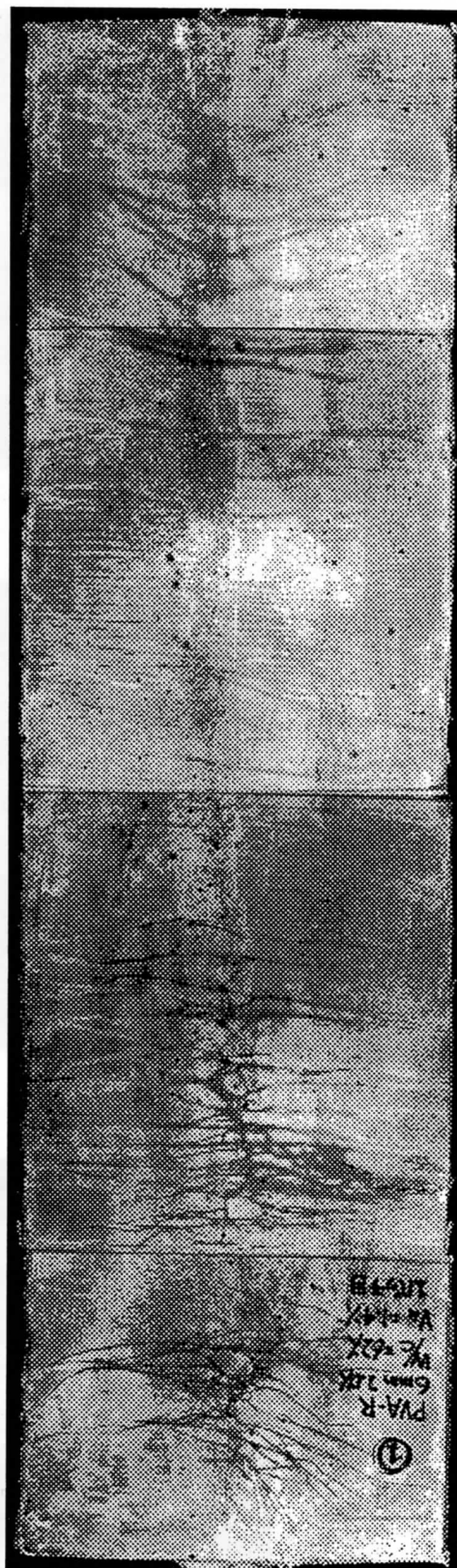
次に引張応力-ひずみ曲線と X 線写真におけるひび割れの進展状況を比較すると、いずれの試験体においても同様に第一ひび割れの発生後、やや剛性を低下していることが分かる。しかしながら、従来のセメント系材料と異なり、ひび割れが入った後も架橋力の上昇により比較的高い引張力を FRCC が受け持ったため、鉄筋のみの引張試験結果に近づくことなく、そのまま応力を維持している様子が見て取れる。その後降伏点に向かうのに伴い、剛性は鉄筋のみのそれとほぼ同じとなるが、荷重は維持しつづける。この応力の維持は降伏点においても損なわれることなく、鉄筋のみの降伏点に比べ、その応力は見かけ上 20%以上の増加を示している。鉄筋の降伏点以降も FRCC はひび割れ数を増加し、引張応力を維持し続けている。



(a) 材料試験結果



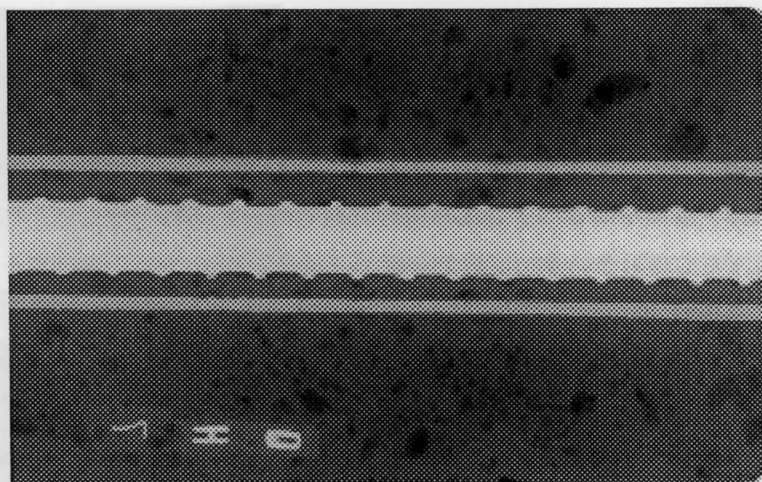
(b) 引張応力-ひずみ曲線



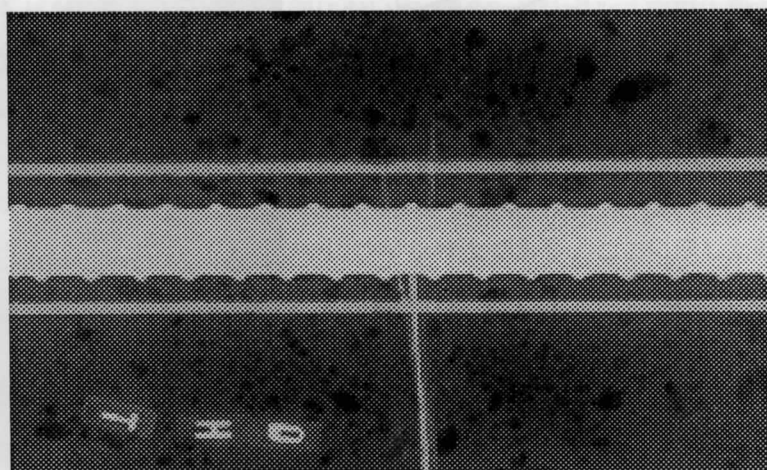
(c) 試験後のひび割れ状況

図 6.2.7 試験結果 (PVAa-1)

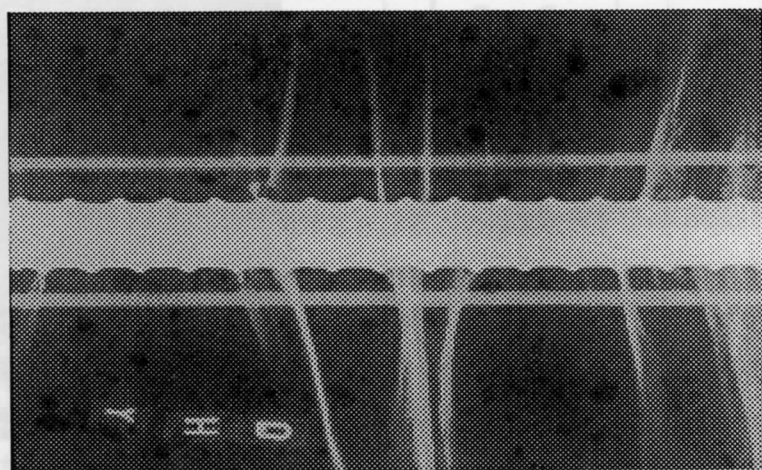




(a) 載荷前

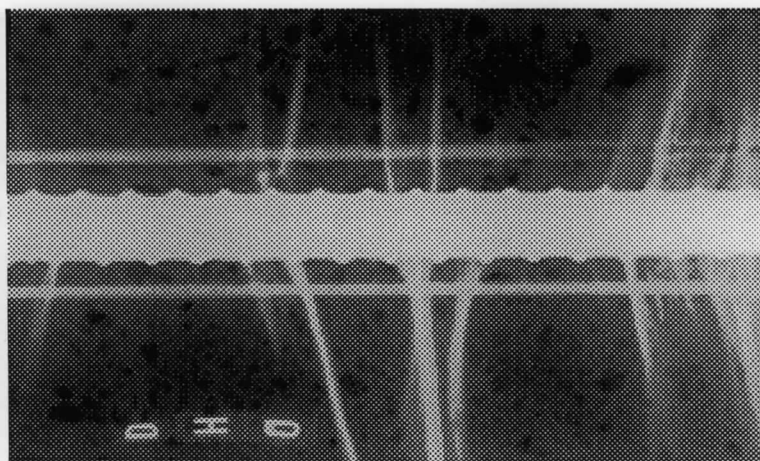


(b) 200MPa

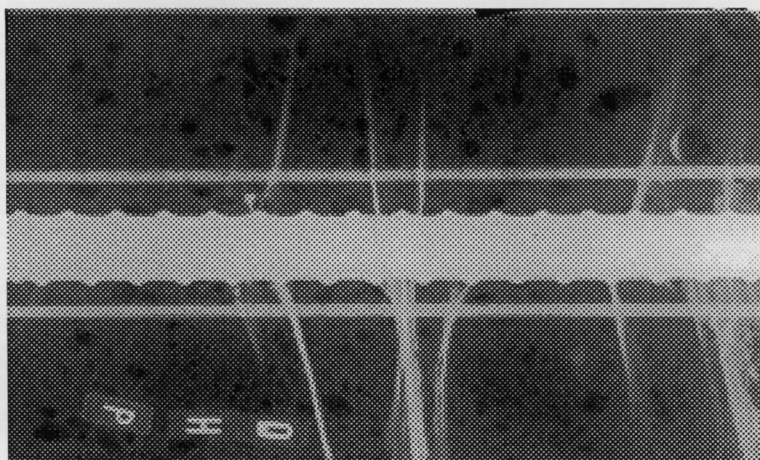


(c) 400MPa

図 6.2.8 X線写真 (PVAA-1 その1)



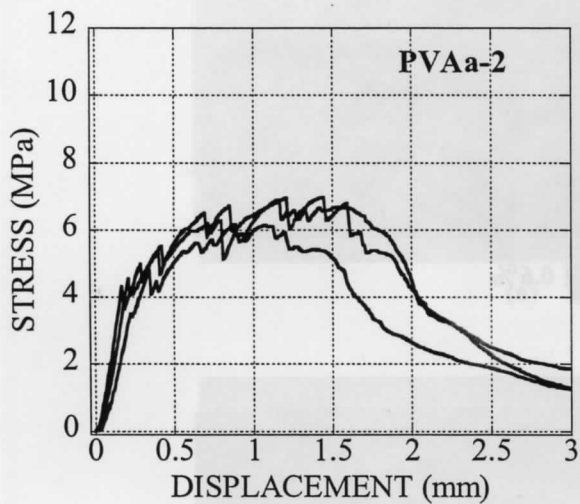
(d) 歪 0.6%



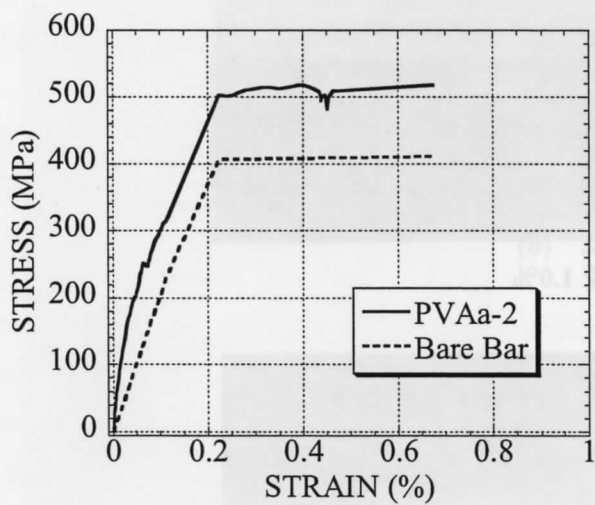
(e) 歪 1.0%

図 6.2.9 X線写真 (PVAA-1 その2)





(a) 材料試験結果

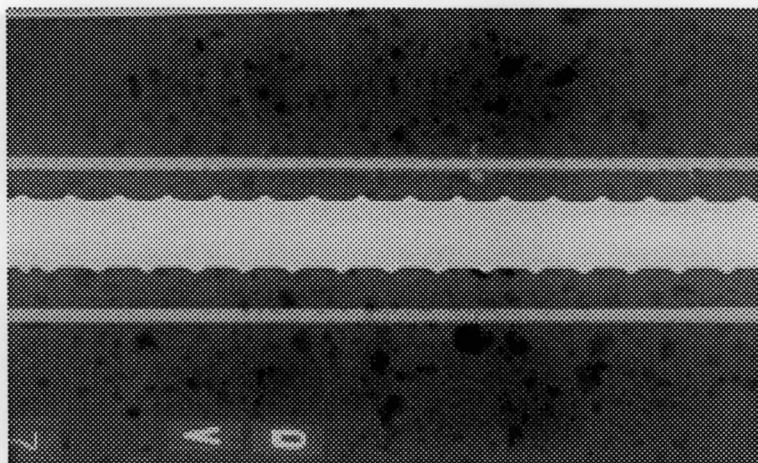


(b) 引張応力-ひずみ曲線

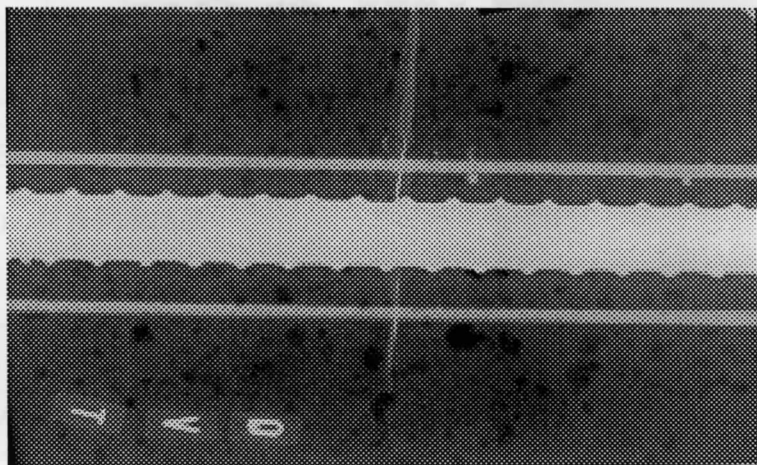


(c) 試験後のひび割れ状況

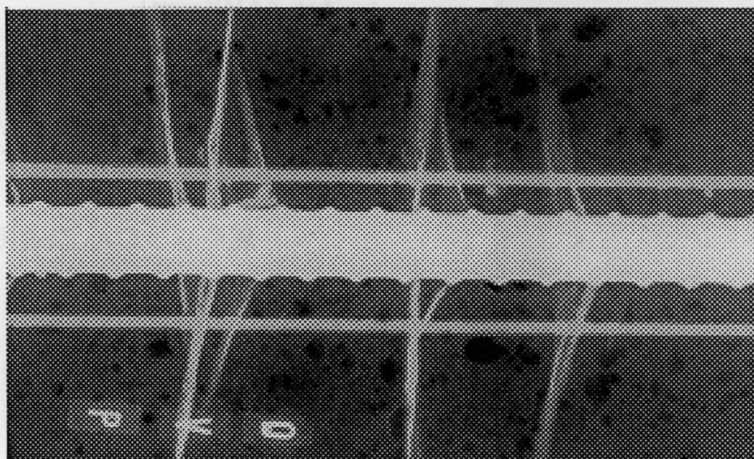
図 6.2.10 試験結果 (PVAa-2)



(a) 载荷前

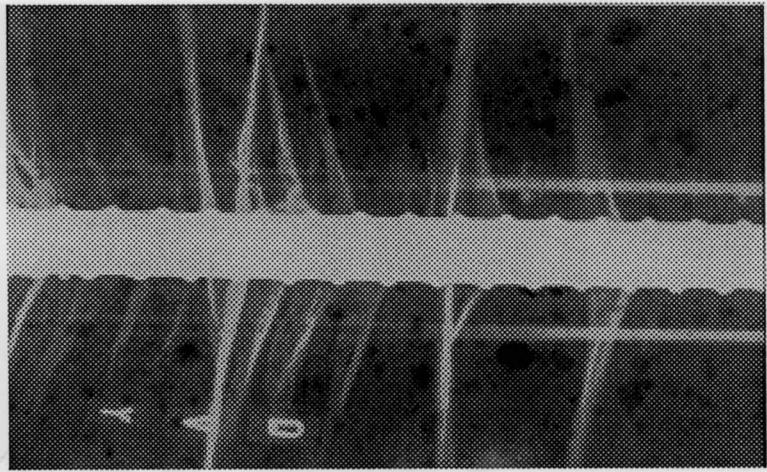


(b) 200MPa



(c) 490MPa (歪:約 0.2%)

図 6.2.11 X線写真 (PVAa-2 その1)



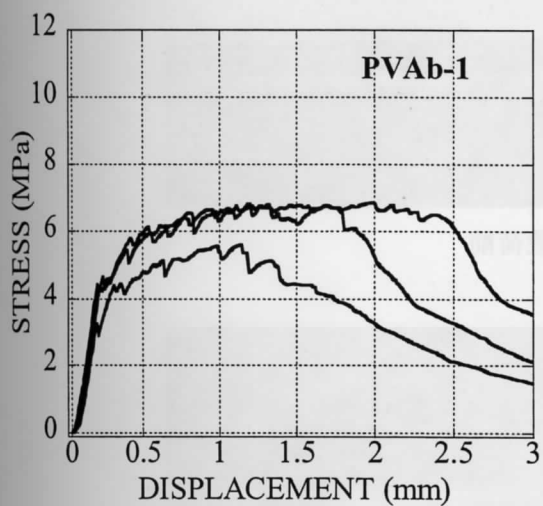
(d) 歪 0.6%

図 6.2.12 X線写真 (PVAa-2 その2)

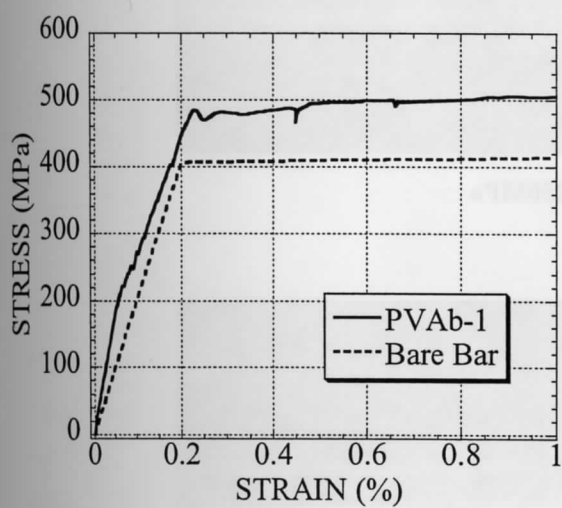


(a) (b) (c) (d) 試験後のひび割れ状況

図 6.2.13 試験結果 (PVAa-2)  
(a) (b) (c) (d) 試験後のひび割れ状況



(a) 材料試験結果



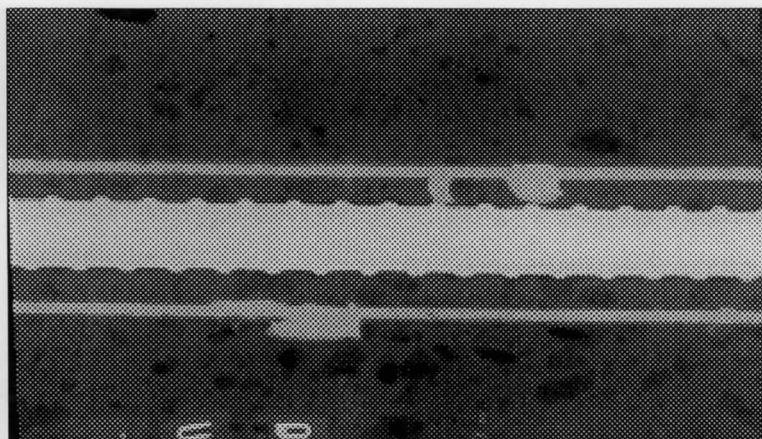
(b) 引張応力-ひずみ曲線



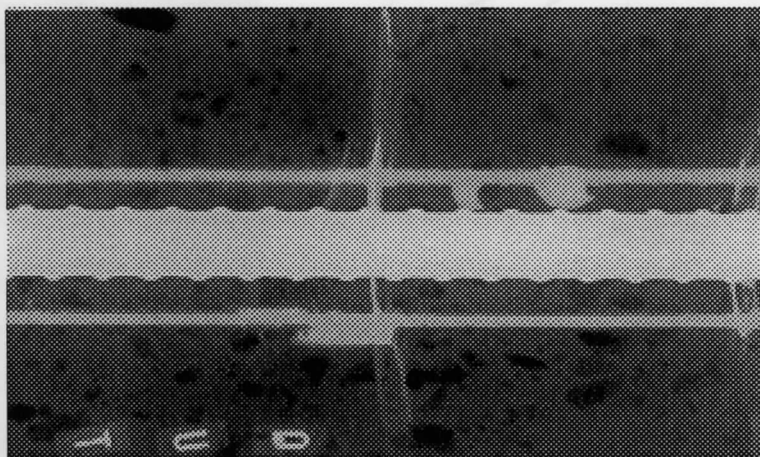
(c) 試験後のひび割れ状況

図 6.2.13 試験結果 (PVA b-1)

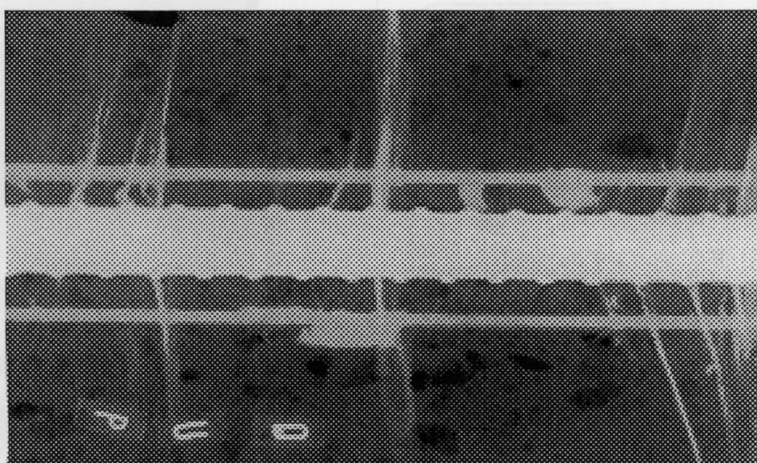




(a) 載荷前

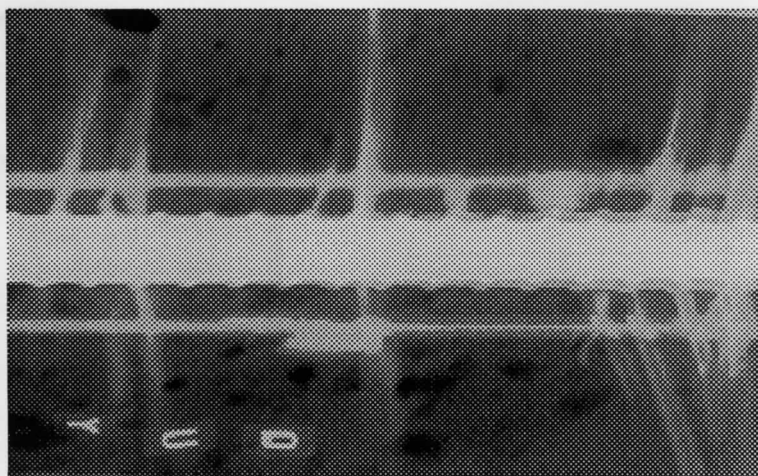


(b) 250MPa

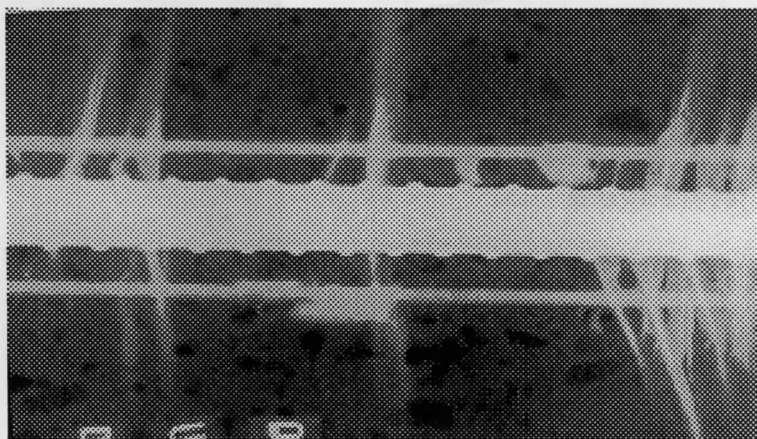


(c) 400MPa

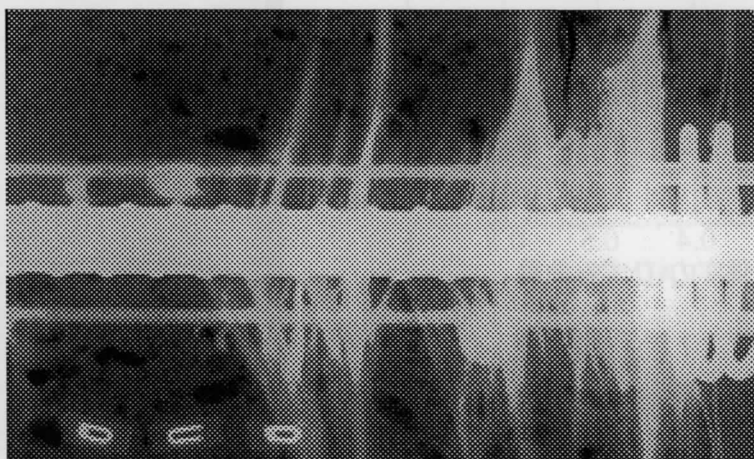
図 6.2.14 X線写真 (PVAb-1 その1)



(d) 歪 0.6%

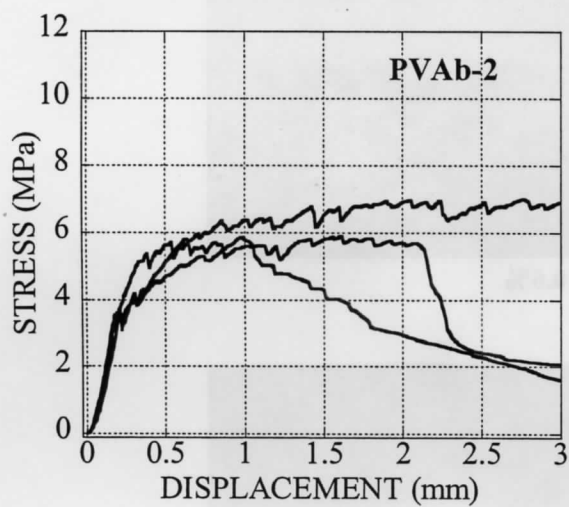


(e) 歪 1.0%

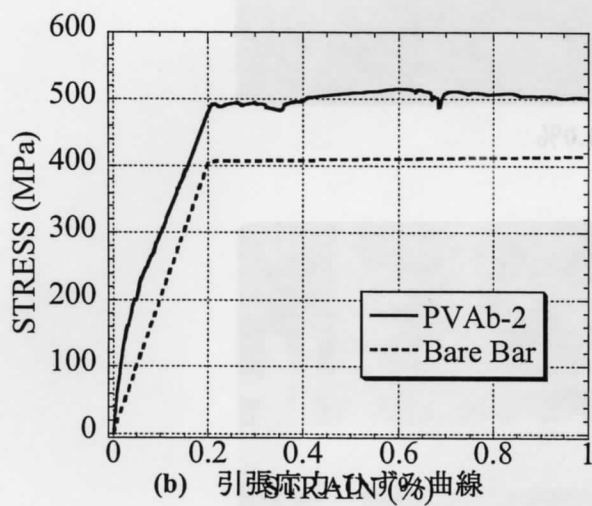


(f) 歪 1.0% (端部)

図 6.2.15 X線写真 (PVAb-1 その2)



(a) 材料試験結果



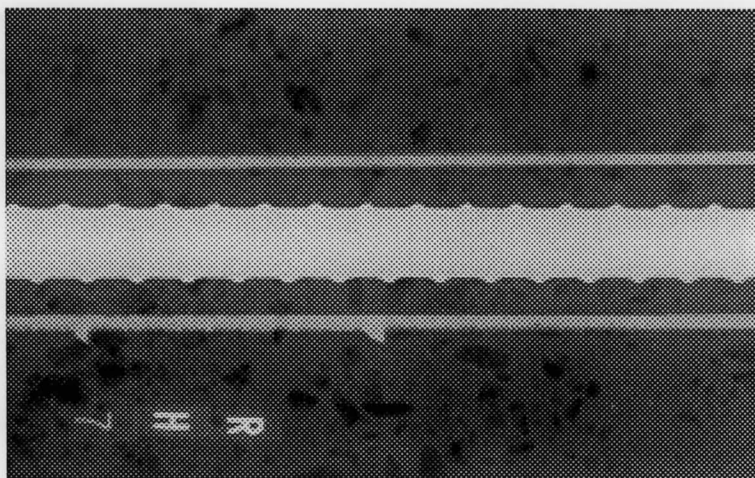
(b) 引張応力-ひずみ曲線



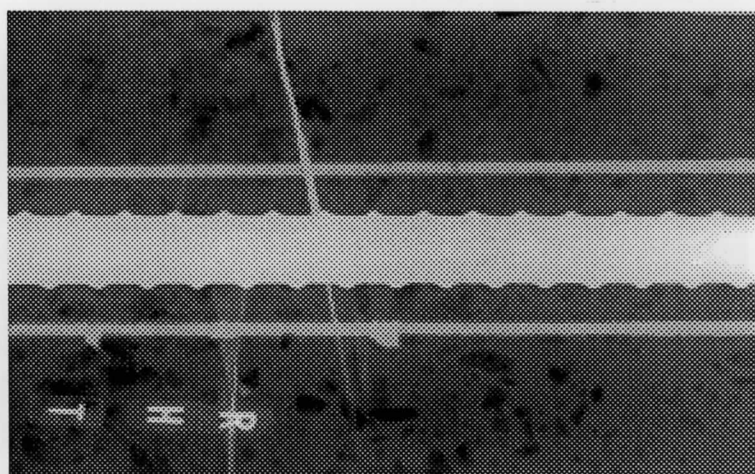
(c) 試験後のひび割れ状況

図 6.2.16 試験結果 (PVAb-2)

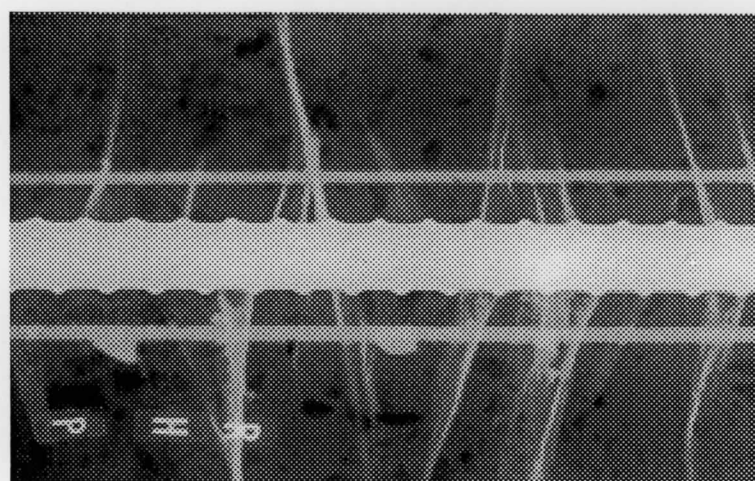




(a) 載荷前

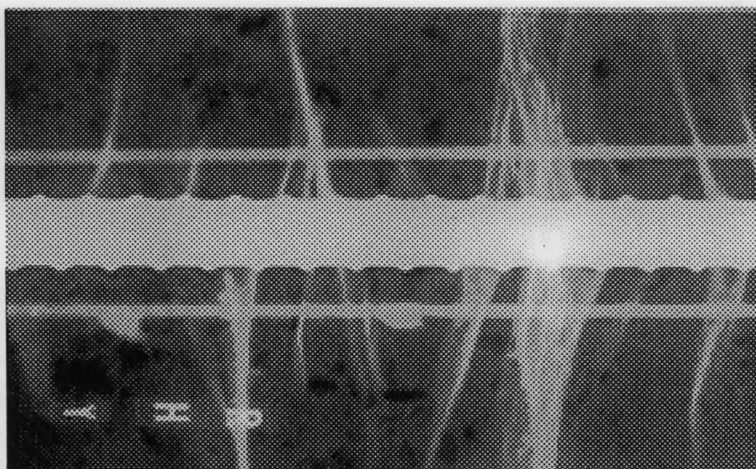


(b) 200MPa

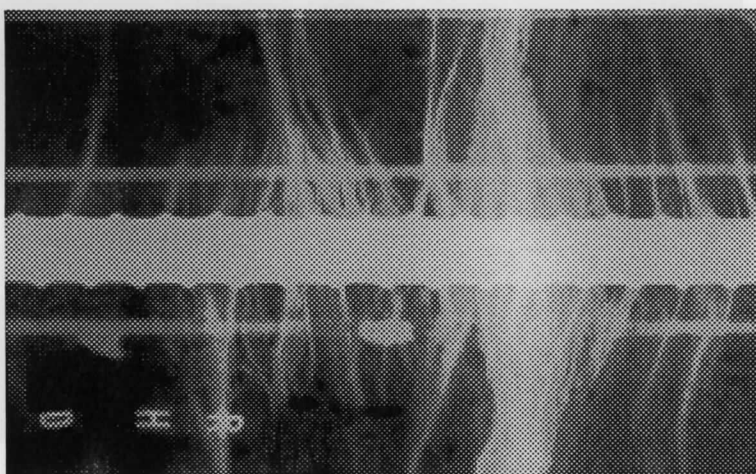


(c) 490MPa (歪:約 0.2%)

図 6.2.17 X 線写真 (PVA<sub>2</sub>-2 その 1)

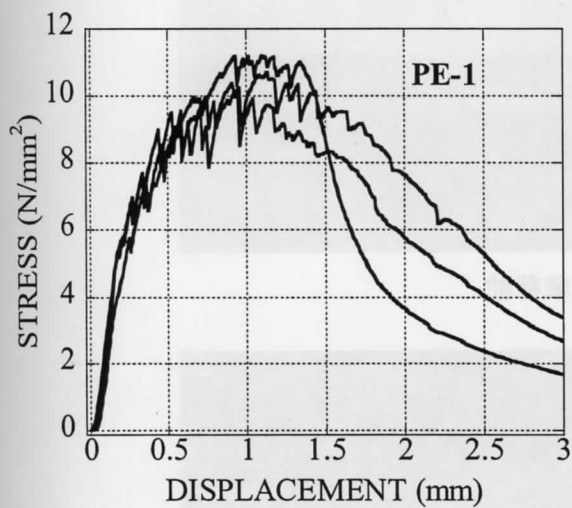


(d) 歪 0.6%

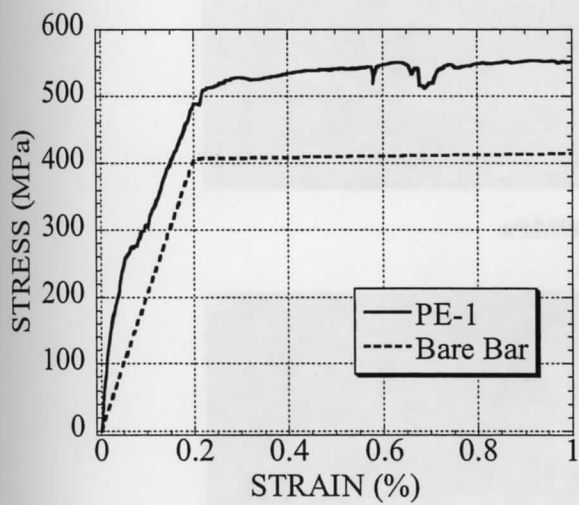


(e) 歪 1.0%

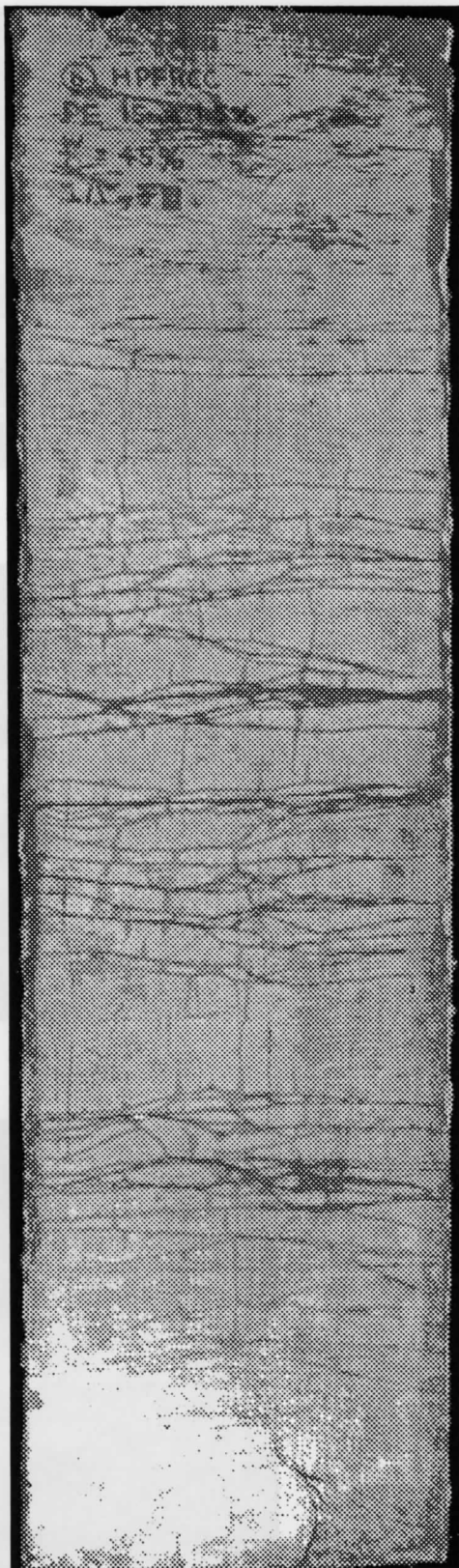
図 6.2.18 X線写真 (PVA<sub>b</sub>-2 その2)



(a) 材料試験結果

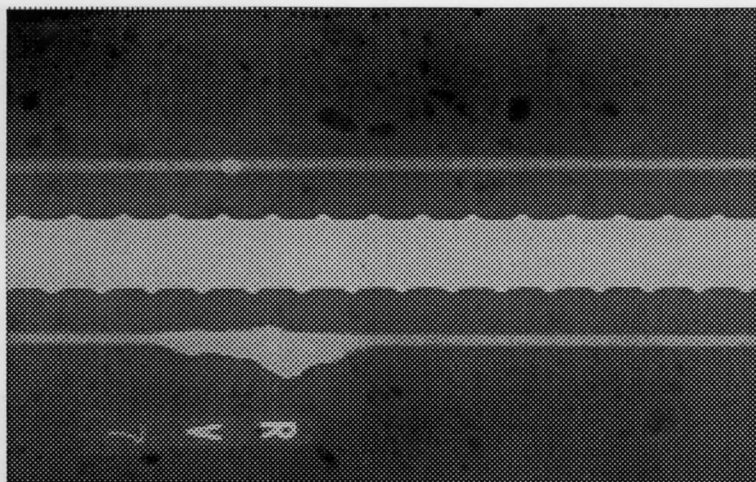


(b) 引張応力-ひずみ曲線

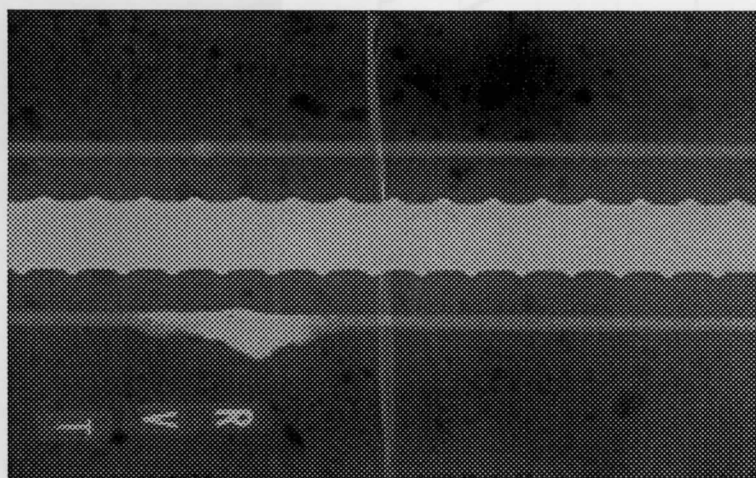


(c) 試験後のひび割れ状況

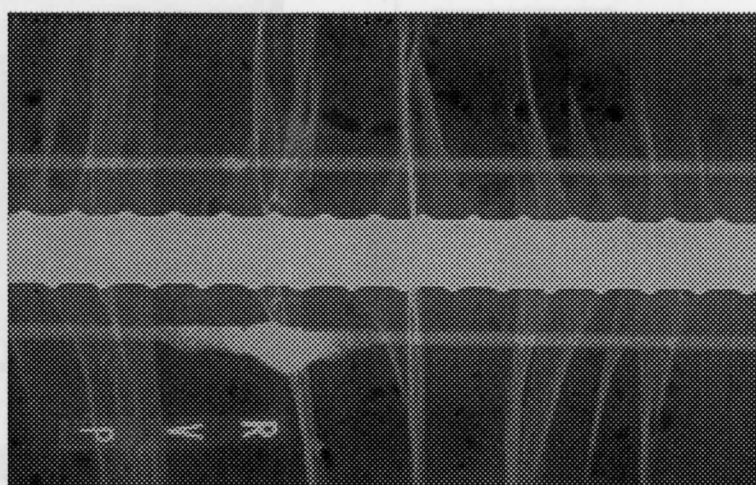
図 6.2.19 試験結果 (PE-1)



(a) 載荷前



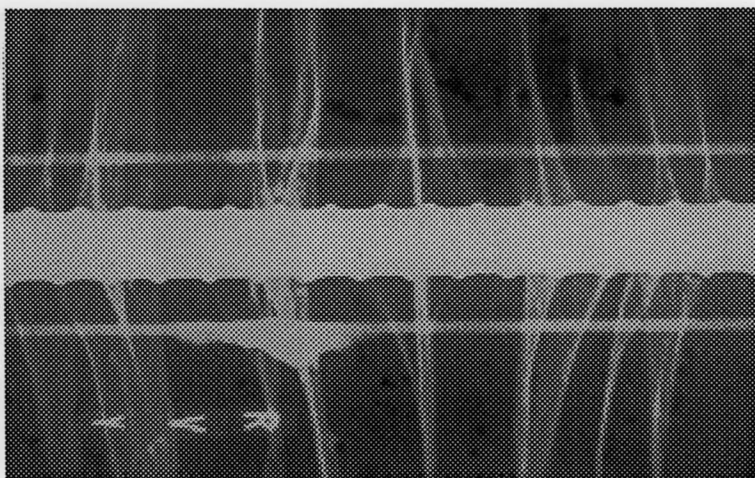
(b) 200MPa



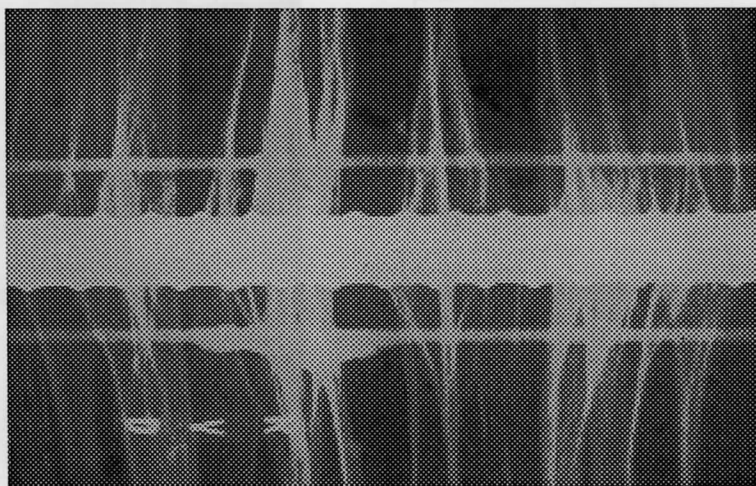
(c) 490MPa (歪:約 0.2%)

図 6.2.20 X 線写真 (PE-1 その 1)



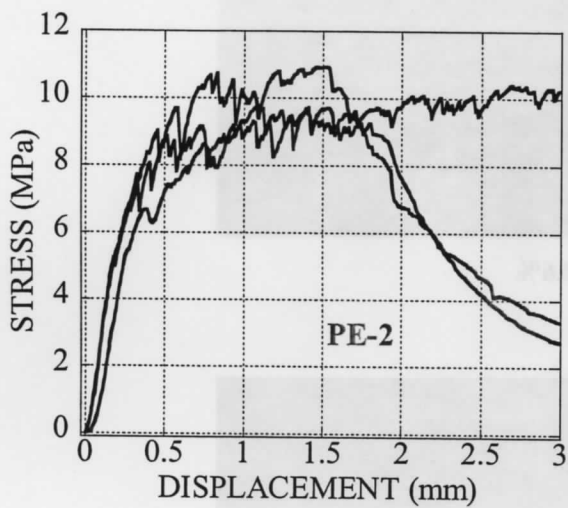


(d) 歪 0.6%

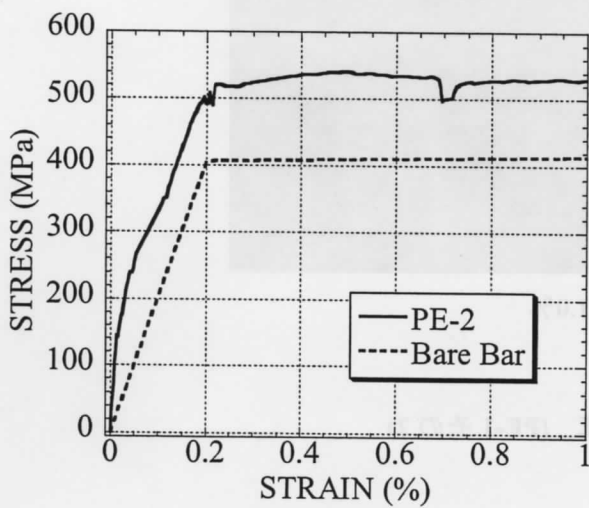


(e) 歪 1.0%

図 6.2.21 X 線写真 (PE-1 その 2)



(a) 材料試験結果

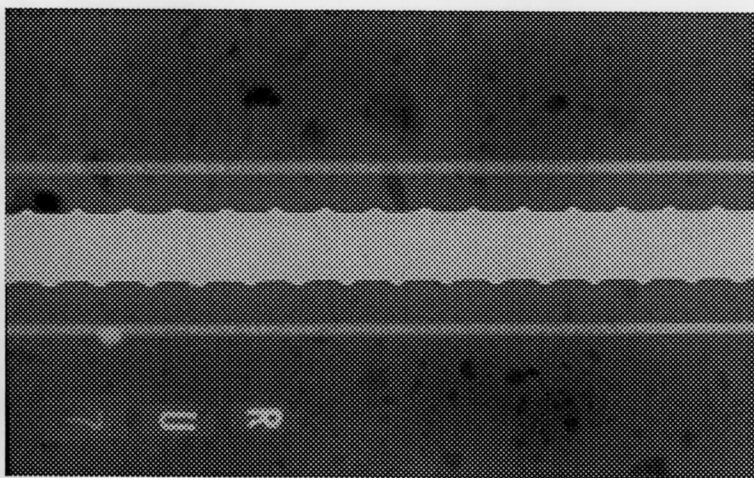


(b) 引張応力-ひずみ曲線

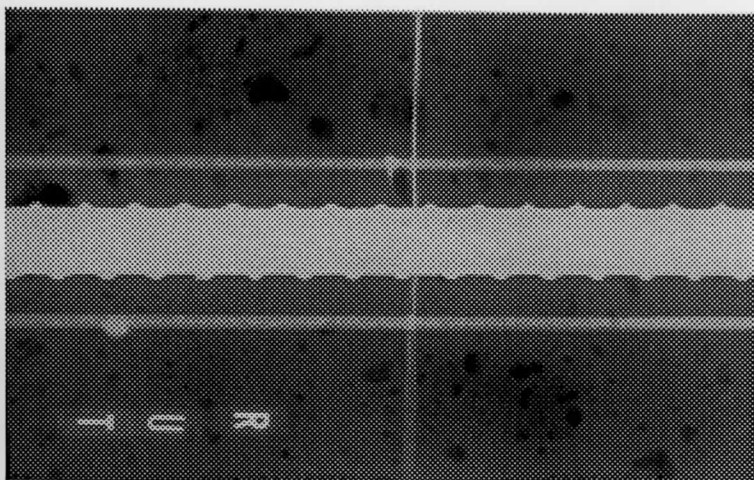


(c) 試験後のひび割れ状況

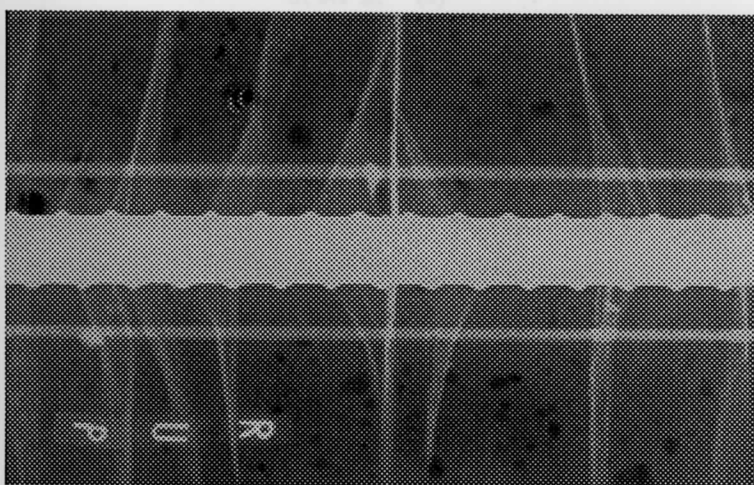
図 6.2.22 試験結果 (PE-2)



(a) 载荷前



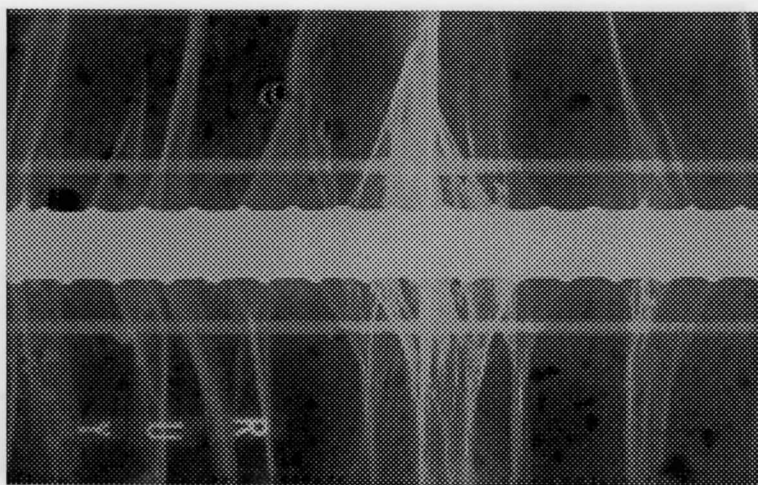
(b) 175MPa



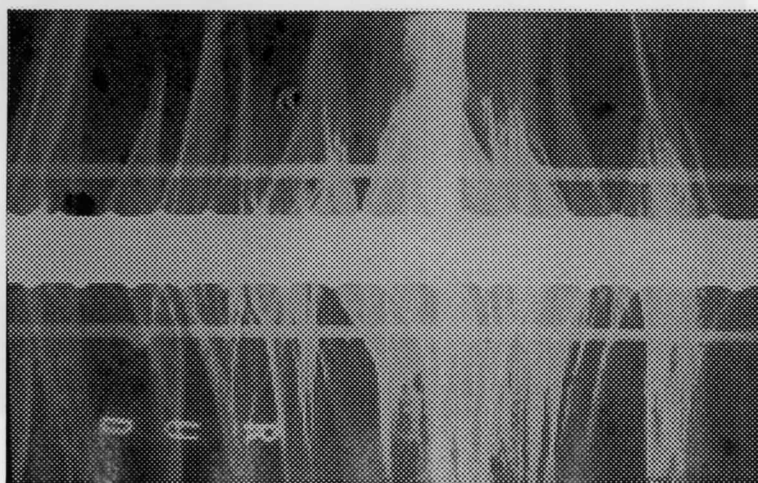
(c) 490MPa (歪:約 0.2%)

図 6.2.23 X 線写真 (PE-2 その 1)





(d) 歪 0.6%



(e) 歪 1.0%

図 6.2.24 X線写真 (PE-2 その2)

## 6.2.9 鉄筋及び FRCC の相互作用に関する考察

前節では、FRCC のひび割れ分散の様子から、鉄筋降伏の局所化が緩和され、比較的広領域における鉄筋の塑性化の可能性について論述した。

ここでは、鉄筋と FRCC の引張応力の負担について検討を行う。まず、図 6.2.7,10,13,16,19,及び 22 にそれぞれ(b)に示した引張応力-ひずみ曲線において、引張応力から鉄筋の応力を減じ、更に鉄筋の断面積を乗じた上で、FRCC の面積で除したものを FRCC の引張応力負担分として考えて求めた、それぞれの FRCC が分担した引張応力-ひずみ曲線を図 6.2.25 に示した。曲線上で所々に荷重が急激に低下し、また再上昇している点が見られるのは、先述の試験機のホールドによるものである。

また、比較のため、国土交通省国土技術政策総合研究所にて実施された、本試験における PE と類似の調合における円柱試験体の直接引張試験<sup>5)</sup>から得られた引張応力-ひずみ曲線<sup>6)</sup>を引用し、更に本試験における PE-1 及び 2 の分担引張応力をまとめて図 6.2.26 に示した。ここで示した試験体の調合は繊維混入率、繊維種類、水結合材比は本研究に用いた調合と同様であるが、珪砂の種類や増粘剤の種類及び混入量において、多少の相違がある。しかしながら、その違いはこれらの結果を比較するのに、影響は十分に小さいものと考えられる。

図 6.2.26 を見ると、初期剛性は本試験における FRCC の負担分と直接引張試験結果は一致している。従って、ひび割れ発生以前では FRCC を RC 部材に適用した場合、鉄筋と FRCC 両者の剛性を足し合わせて考えて良いということが分かる。しかしながら、ひび割れ発生後も本試験における FRCC の負担引張応力-ひずみ曲線では剛性の低下が直接引張試験結果に比べて少なく、また応力も高く上昇し、高い初期ピークを形成している。更にその後は応力の低下が顕著となり、0.2%のひずみに至るまで急激に応力は低下し、直接引張試験の結果を下回る。そしてまた応力は再上昇し、直接引張試験の結果に近づいている。

以下にこれらの力学的挙動に関する考察を述べる。

### <初期ピークにおける応力の上昇>

小さいひずみにおいて応力が上昇し、高い初期ピークを形成したということは、鉄筋の応力を過小評価していないとすれば、FRCC における引張応力の負担分が何らかの理由で直接引張試験における引張応力に対して見かけ上の増強効果が存在する事を示している。

その一つとして考えられるのが、鋼管コンクリート構造などで良く指摘されている「たが効果」(あるいは、コンファインド効果)が FRCC の場合も擬似的に作用するということである。RC において鉄筋に軸力が付加されると節からの支圧力によって、コンクリートにコーン状クラックが進展する。一方鋼管コンクリートの場合は鋼管がコンクリートを拘束するため、鉄筋からの支圧力に対して、コンクリートに圧縮応力が発生し、2軸圧縮応力の下でひび割れ発生応力は上昇するために、引張強度は見かけ上増大する<sup>7)</sup>。

図 6.2.27 に FRCC における「たが効果」を示す。鋼管を用いず、FRCC をコンクリートの代わりに用いた場合、FRCC はある程度の引張力に耐えるため、ひび割れの進展していない領域において、FRCC が鋼管と同様の拘束効果を発揮し、内部の FRCC を拘束する事が考えられる。この効果は節付近から進展するひび割れ

が試験体表面に達し、更に内部の FRCC を拘束できなくなると低減される。従って図 6.2.26 における見かけ上の引張強度上昇効果は、この擬似的な「たが効果」がもたらした可能性があると考えられる。しかし、それを明らかにするためには、より詳細な X 線によるひび割れ観察やひずみの正確な測定など、今後更に詳しい検討が必要であると考えられる。

更に試験体の長さ方向での引張荷重の分布について考えると、直接引張試験は材料に直接引張力を加力するため、その破壊は材料中の欠陥や材料の不均一性に起因する応力集中により、材料そのものの弱点において優先的に進行する。FRCC の場合は、はじめに破壊の進行が始まった点が架橋力の増大により硬化することで、その他の部位における破壊を促し、その繰り返しによって破壊領域を広範囲に分散させ、ひずみに耐える。この破壊形式をとる FRCC の場合は、初期ひび割れ発生の後、ひずみ硬化に伴い荷重を常に増大してピークに至り、ひび割れ増大の局所化が始まると共に軟化に入る。

一方、本研究で行われたような埋め込み鉄筋の一軸引張試験の場合は、引張力は直接 FRCC に伝達されず、主に異形鉄筋の節による支圧力によって伝達される。鉄筋の節は鉄筋表面に均等に配置されているため、直接引張試験の場合のように、FRCC に伝達される引張応力は、材料中の弱点に集中的にひび割れを引き起こすことにはならず、鉄筋のひずみ分布に従い分散して付加されと考えられる。このことは、FRCC の破壊が材料中の弱点部分で優先的な進行をするとは限らないことを意味しており、FRCC 円柱試験体の直接引張試験の結果に比べてより高い引張強度を示したもう一つの理由になるものと考えられる。

#### <初期ピーク以降の応力の低下>

ここまで初期ピークにおける耐力の上昇に関して、擬似的な「たが効果」及び応力作用の相違による破壊開始点の分布の変化といった事柄の影響を考察してきた。ここでは図 6.26 における初期ピーク以降の応力の急激な低下について考察する。

まず応力の低下の原因として考えられるのが、先述した FRCC の引張力増強効果の低減及び、FRCC の引張負担応力の低下、もしくは鉄筋の負担する引張応力の過大評価の 3 点である。ここで、FRCC の引張耐力増強効果の低減は、上昇した引張応力が低減した理由の一つとして考えることもできるが、低下した引張負担応力が直接引張試験結果を下回ることに対する説明にはならない。

そこで裸鉄筋の引張試験結果と比較しながら、普通のコンクリートに埋め込まれた鉄筋の負担応力について考えると、コンクリートに埋め込まれた鉄筋に一軸引張加力がなされる時、その引張力は鉄筋とコンクリートがそれぞれ分担して負担している。しかしながらひび割れが発生すると、その位置においては鉄筋のみが全引張力を負担する事となる。従って、ひび割れ位置での鉄筋の応力と、鉄筋及びコンクリートの平均応力の関係は次式のように表されることになる。

$$\sigma_{cr} = \bar{\sigma}_s + \bar{\sigma}_c / p \quad (6.2.2)$$

ここに、

$\sigma_{cr}$  : ひび割れの位置での鉄筋の応力

$\bar{\sigma}_s$  : 要素内での鉄筋の平均応力

$\bar{\sigma}_c$  : 要素内でのコンクリートの平均応力

$p$  : 鉄筋比

この場合、ひび割れの位置で鉄筋の応力が降伏応力に達した時に鉄筋の降伏が始まるが、その時点ではひび割れ間の鉄筋の応力は降伏応力に達していないために平均応力と平均ひずみは裸鉄筋の降伏点よりも低いところにあるということになる<sup>8)</sup>。

本試験の場合、ひび割れ発生後も FRCC の引張力負担分はひび割れ点においても 0 にはならず、またひび割れの有無により変化するので、鉄筋の応力も試験体長さ方向に対して一定とはならない。従って、鉄筋コンクリートの場合と同様に、鉄筋がいずれかの位置において降伏した時も、試験体内の鉄筋には降伏応力に達していない部分が存在し、その結果鉄筋の平均応力及び平均ひずみは、裸鉄筋の降伏応力よりも低くなる。

本研究においては FRCC 部材要素の平均引張応力-ひずみから、裸鉄筋の応力-ひずみを直接引いたために実際に埋め込まれた鉄筋が降伏した時の応力を過大評価している事になるため、0.2%程度のひずみに至るまで、あたかも FRCC の引張力負担分が低減されたかのような結果を示したと考えられる。従って、この影響を考慮すると、実際の FRCC の引張力負担分は図 6.2.26 に示すほど小さいひずみにおいて急激な減少をしてはいないと推定することができる。この推定の検証は、鉄筋のひずみ分布を試験体全長において測定する試験によって可能であり、今後の検討課題として考えられるものである。

#### <初期ピーク後の応力低下以降の挙動について>

図 6.2.26 において、PE-1 の結果は直接引張試験の結果と概ね一致し、PE-2 の結果はやや低い応力となっていることが分かる。ここでは、この応力の低下以降の領域に関して以下に考察する。

まず PE-1 と PE-2 における実験後の写真を見比べると、PE-2 では切り欠き部分に大きな局所化ひび割れを確認することができる。すなわち、PE-2 では FRCC がそれほど均一に変形せず、十分な引張抵抗性能及び均一な変形性能を示さなかったものと考えられる。PE-2 が直接引張試験結果や PE-1 に比べて低い応力を示したのは、このひび割れの局所化が原因であると考えられる。

降伏後ひずみが進むのに伴い、図 6.2.26 における本試験での FRCC の平均応力-平均ひずみ関係が直接引張試験のそれに一致したという結果は、ひび割れが十分に進展した後には、先述の「たが効果」は作用しなくなることに対応している。また、コンクリートの代わりに FRCC を用いた場合、ある程度のひずみ以降において、内部鉄筋の応力と裸鉄筋の応力が近い値となっている事、更に、鉄筋補強 FRCC 部材の終局的力学挙動は、鉄筋と FRCC それぞれの足し合わせで表現できる事を示していると考えられる。

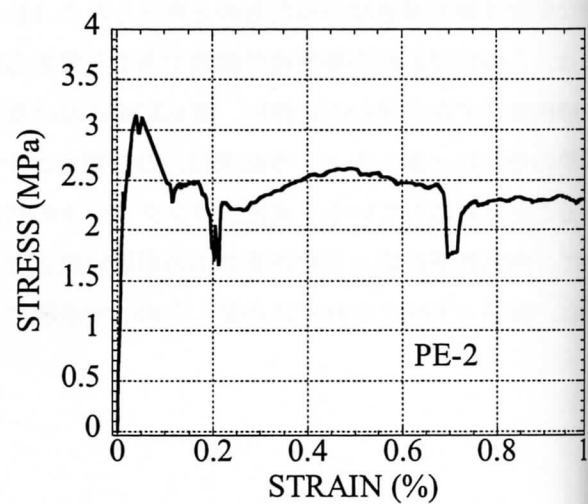
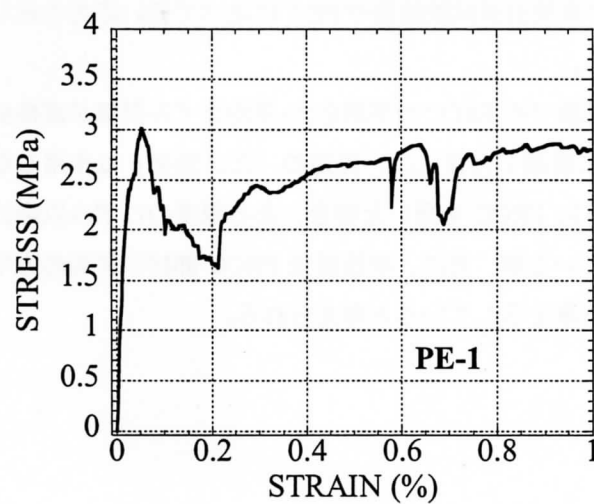
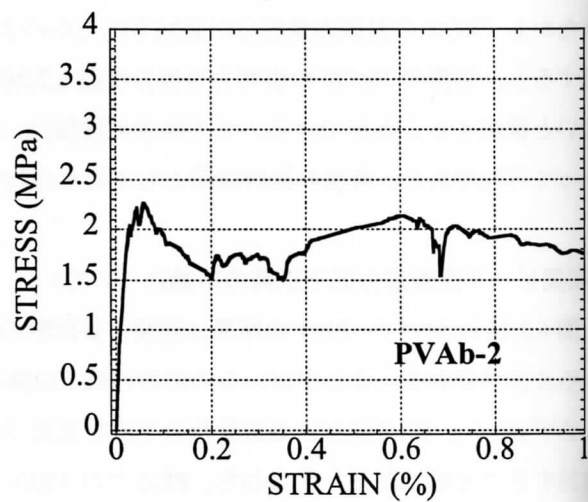
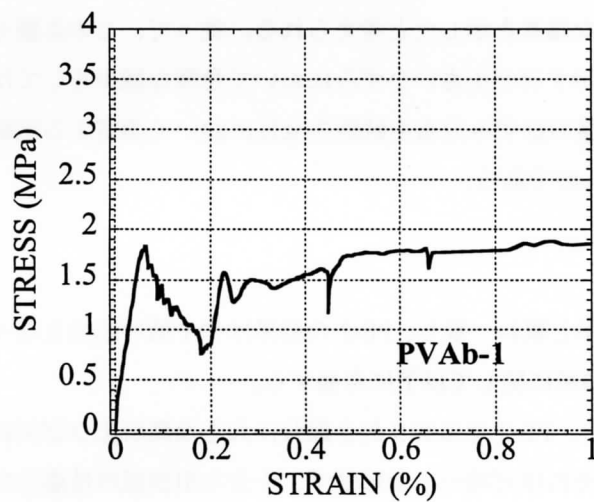
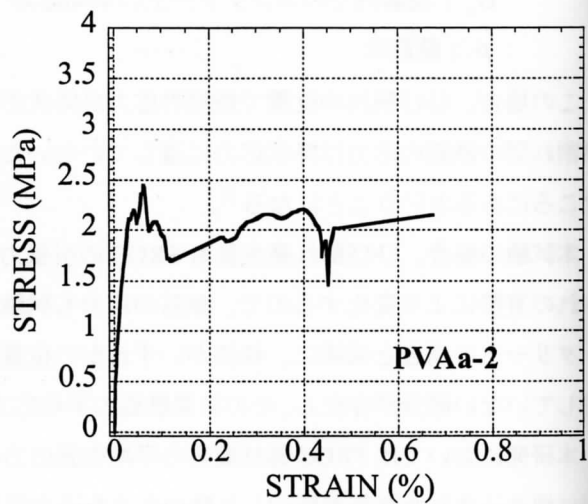
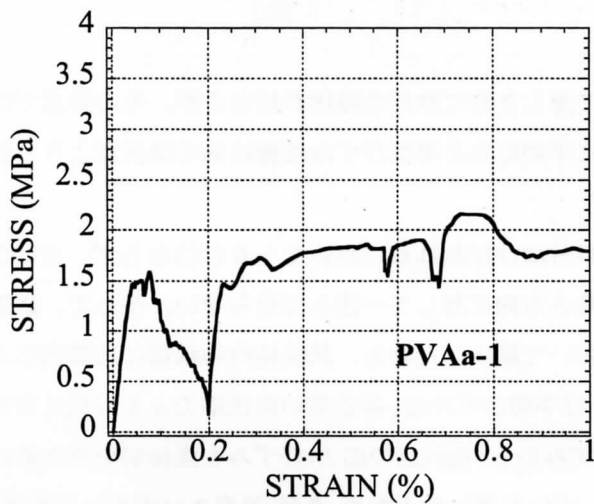


図 6.2.25 FRCC の負担した引張応力-ひずみ曲線

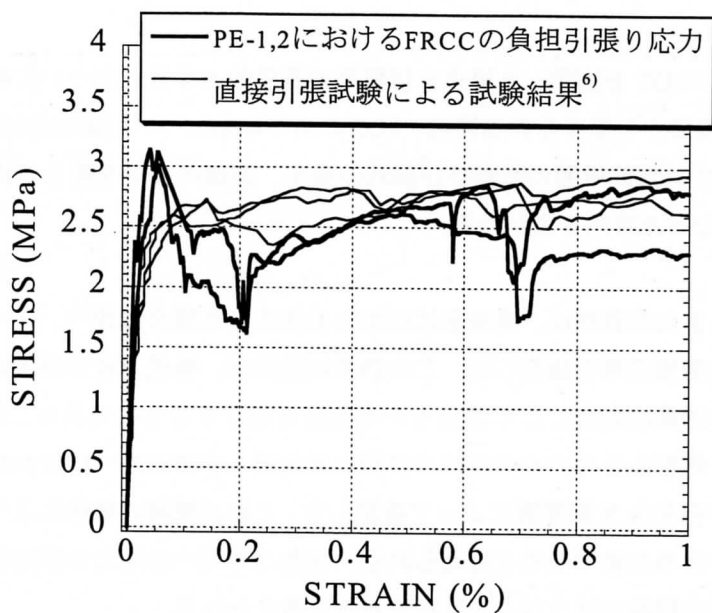


図 6.2.26 PE-FRCC 直接引張試験結果との比較

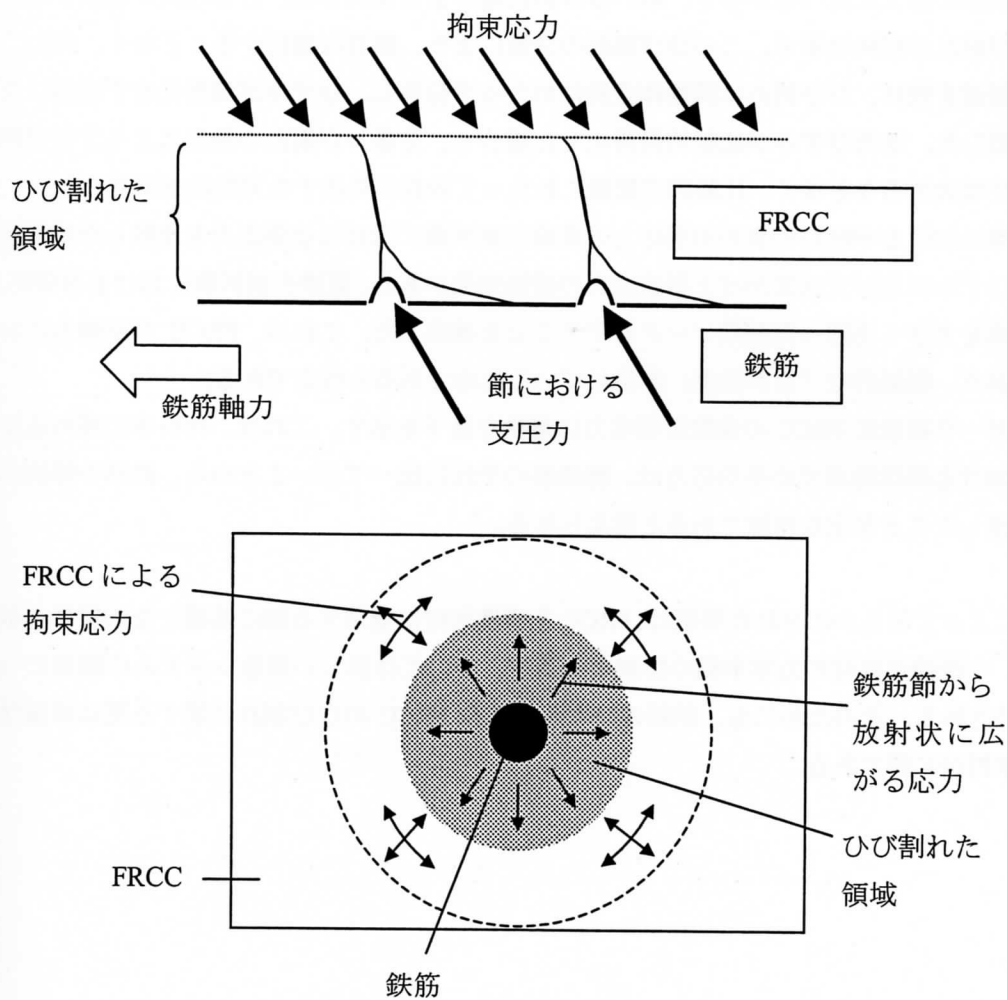


図 6.2.27 たが効果 (あるいは、コンファインド効果)



### 6.3 まとめ

本章では、高靱性 FRCC を適用した構造部材要素の基礎的力学性状について明らかにすることを目的とし、特に一軸引張加力を受ける鉄筋補強 FRCC の力学挙動について実験的検討を行った。また、X 線による観察によって、鉄筋周囲の微細ひび割れの発生、進展の様子を明らかにした。以下に、本研究によって明らかとなった事柄をまとめる。

- (1) FRCC に埋め込まれた鉄筋は、裸鉄筋に引張力を加力した場合に比べ、同一ひずみに対して、より大きな応力の増強効果を確認した。この効果は降伏前、降伏点及び降伏以降においても保持されており、その効果は応力にして 20%もの増強を可能とするものであることが示された。
- (2) FRCC の場合、鉄筋からの力の伝達はひび割れ発生後も非常に均一に行われ、その事を示す均等な横ひび割れの発生を X 線写真によって確認した。これは繊維の架橋によってひび割れを介して引張力が伝達されるためであると考えられる。またこの均一な応力の伝達に関しては、弾性係数の高い、剛な複合材料のほうがより有利であると考えられる。
- (3) FRCC には、鉄筋表面の節によって伝達される支圧力によってひび割れが発生し、鉄筋のひずみに追従して進展する。しかし、このひび割れは、普通コンクリートの場合とは異なり、局所的なひび割れの拡大にはつながらず、細いひび割れ幅のまま保持され、むしろ次々と数を増大し、分散ひび割れの傾向を示す。このひび割れの分散により、鉄筋は露出することなく、FRCC に引張力の伝達を続け、ひび割れは試験体全長にわたって分散し、ひずみが局所化せず全体に及ぶことを確認した。またひずみが比較的局所化した場合も、分散ひび割れの発生によってひび割れ開口変位を増大することなく、比較的広範囲にわたって鉄筋が降伏する可能性を示唆した。
- (4) 本試験における FRCC の負担引張応力と直接引張試験における引張応力を比較した結果、ごく小さいひずみにおいては見かけ上引張応力の増強効果があり、直接引張試験における引張応力-ひずみ曲線を大きく上回った初期ピークを示すことを確認した。これは、FRCC が引張力において優れており、擬似的な「たが効果」が生じているためであると推定できる。
- (5) 初期ピーク直後に FRCC の負担引張応力は急激な低下を示す。これは、材料中に埋め込まれた鉄筋における降伏時点での平均応力は、裸鉄筋のそれに比べて低いことから、鉄筋の降伏応力を過大評価したことが主な原因であると考えられる。

本研究によって明らかにされた事柄は、FRCC を構造部材に適用する際に基礎となる項目を示すに過ぎないが、今後構造部材の力学挙動の詳細な解明や、ひいては詳しい構造システムの開発につながることを期待される。そのためにも、鉄筋のひずみ分布や FRCC のひび割れに関する更に詳細な実験及び解析的検討が必要である。



[参考文献]

- 1) V. C. Li, D. K. Mishra and H. C. Wu : Matrix Design for Pseudo-Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites, Materials and Structures, RILEM, Vol.28, pp.596-595, 1995.
- 2) Michael P. Collins and Denis Mitchell : Prestressed Concrete Structures, Prentice-Hall, Inc., 1991, 766p.
- 3) 大塚浩司 : 造影剤を用いた X 線透過撮影による鉄筋コンクリートの微細ひび割れ検出に関する研究, 科学研究費補助金研究成果報告書, pp.9-14, 1991.
- 4) Y. Goto : Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars, ACI Journal, Vol.68, No.4, pp.224-251, 1971.
- 5) 佐藤幸博、福山洋、諏訪田晴彦 : 高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰り返し試験方法の提案、日本建築学会構造系論文集、No.539、pp.7-12、2001.
- 6) 例えば、諏訪田晴彦・福山洋・磯雅人 : 構造物の高性能化に向けた高靱性繊維補強セメント複合材料の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、pp.133-138、2001.
- 7) A. B. Vliet and J. Uijl : Cracking Behaviour of RC Tensile Members Simulated with Confinement Based Bond Model, Tension of Reinforced Concrete Prisms, Luleå University of Technology, pp.3.1-12, 2001.
- 8) 玉井真一、島弘、出雲淳一、岡村甫 : 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係、土木学会論文集、Vol.378、No.5、pp.239-247、1987.

## 第7章 異形鉄筋周りのひび割れ進展挙動と付着特性 (Part II : ハイブリッド型複合材料)

### 7.1 はじめに

本章では多段階ハイブリッド型複合化の有効性を検討するために、ハイブリッド型高靱性セメント系複合材料による補強効果について検討を行う。ハイブリッド型高靱性セメント系複合材料のコンセプトであるミクロクラックは合成繊維が補強して、合成繊維が補強しきれない程度に拡大したメゾクラックにはスチールコードが有効に働き、更にそれ以上に拡大したマクロクラックは鉄筋が補強するというひび割れのレベルにより補強材が異なるというひび割れ抵抗システムを検証するために、HFRCCにより補強された鉄筋の両引き試験を行う。マトリックスに埋め込まれた鉄筋を引っ張るとマトリックスのひび割れ箇所から鉄筋は降伏すると言われている。そこでマトリックスが微細ひび割れを示すことにより鉄筋の降伏領域は拡大すると考えられる。鉄筋の降伏領域の拡大は、鉄筋が点で降伏したときよりも部材の引張性能を向上するものと考えられる。又、マトリックスのひび割れの微細化は、普通コンクリートの構造物で多くの場合に問題となる耐久性の向上にも繋がるものと考えられる。更に、FRCCで補強された鉄筋の引張挙動のメカニズムを解明することは構造要素の解明に繋がるため、メゾレベルとして位置付けられる構造要素の検討はマクロレベルの構造システムとミクロレベルの構成材料の橋渡しとなり精度良い性能予測への一助になるものと考えられる。そこで本研究では複合体により補強された鉄筋の両引き試験での鉄筋周辺のひび割れ発生・進展状況を観察すると共に、テンションスティフニング効果に着目して検討を行う。

FRCCに埋め込まれた鉄筋が引張力を受ける場合、ひび割れ発生過程で、あるいはひび割れが発生した後も、そのひび割れ間でFRCCは引張力を負担する。その結果、鉄筋が降伏するまでの過程で鉄筋単体に引張力を与えた場合よりも、より高い抵抗力を示す<sup>1)</sup>。コンクリートではなくHFRCCを使用した場合、引張抵抗力が更に大きくなり、鉄筋の歪に追従して荷重を維持するという特徴があることから、鉄筋のテンションスティフニング効果はFRCCを使用した場合のそれに比べ更に大きなものとなると考えられる。

本章では、ミクロやメゾのレベルのひび割れを試験体の外部から検証することは困難であるため、鉄筋周辺の微細なひび割れ状況を観察する目的で第6章と同様にX線による透過撮影を行うことにより、試験体内部のひび割れ状況を観察すると共に、テンションスティフニング効果の検討を行った。

### 7.2 X線透過撮影による鉄筋の両引き試験に関する実験的検討

#### 7.2.1 実験方法

##### 7.2.1.1 使用材料

マトリックスに使用された材料を表7.2.1に示す。又、使用された繊維は第5章で使用したポリエチレン繊維（繊維長さ：6mm、繊維径：12 $\mu$ m、引張強度2770MPa、引張弾性率：88GPa）とスチールコード（カット長さ：32mm）である。使用した鉄筋の物性を表672.2に示すが、鉄筋径は第6章に用いたものと同じくD16である。

7.2.1.2 調合

調合を表7.2.3に示す。ここではポリエチレン繊維のみを混入したFRCCとスチールコードの混入率が異なる二種類のHFRCCについて鉄筋の両引き試験を行った。ここではポリエチレン繊維を使用したFRCCとHFRCCが比較できるように繊維混入率を合わせたHFRCCaを用意した。又、HFRCCbは前章で高い曲げ性能及び引張性能を示したH40PE6Aと同様の調合である。FRCC多段階補強型高靱性セメント系複合材料では、ミクロクラックを合成繊維が補強して、ひび割れがメゾレベルまで達するとスチールコードが架橋すると考えている。そのため、本実験では、スチールコードの有無によりひび割れの発生と進展の状況を比較、検討することを目的としている。

表7.2.1 使用材料

	略号	比重	備考	製造元及び製品名
セメント	C	3.14	平均粒径：13 μm	宇部三菱マテリアル社製 早強ポルトランドセメント
シリカフューム	SF	2.20	平均粒径：0.15 μm	エルケムジャパン社製 エルケムマイクロシリカ
7号珪砂	S	2.61	平均粒径：1.05-120 μm	ショーボンド社製
高性能AE減水剤	SP	1.1	主成分：芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物	藤沢薬品工業社製 パリックFP200U

表7.2.2 鉄筋の物性

寸法	規格	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D16	JIS G3112 SD345	404	551

表7.2.3 調合

	W/B (%)	SF/B (%)	S/B (%)	使用繊維	繊維混入率(vol.%)	
					PE	SC
FRCC	40	20	40	PE	1.5	-
HFRCCa				PE+SC	1.0	0.5
HFRCCb				PE+SC	1.0	1.0

B=C+SF、PE：ポリエチレン繊維、SC：スチールコード

### 7.2.1.3 試験体概要及び作製方法

試験体は、第6章で用いたものと同様であるが、試験体概要を図6.2.1に示す。試験体にはX線透過撮影用の造影剤（炭酸セシウム水溶液）を充填するための孔が鉄筋に平行に設けられており、試験前に予めこの孔に造影剤が充填されている。又、鉄筋一本の両引き試験では試験体外で鉄筋が降伏する恐れがある。そのため試験体端部では鉄筋を3本溶接することにより試験体内で鉄筋が降伏するように制御した。試験体にはひび割れの発生箇所を制御するために試験体中央部両端に切り欠き（深さ：5mm）を設けた。更に、鉄筋の引き抜けによる割裂ひび割れを抑制するため、且つ鉄筋からの複合体マトリックスへの引張力の伝達を促すためにスパイラル筋を設けて複合体マトリックスと鉄筋の端部を拘束した。スパイラル筋は直径4mmのなまし鉄線を用いて作製した。又、銅パイプは直径5mmのものをを用い、試験体内で安定させるため端部を開き、FRCCと定着させた。又、内部のひび割れが試験体表面まで達しても造影剤が漏れ出さないように試験体表面にはシーリング材を塗り、造影剤の漏れを防止した。

### 7.2.1.4 試験方法

試験方法は、第6章（6.2.5）に示すものと同様であるので、省略する。

## 7.2.2 実験結果及び考察

### 7.2.2.1 X線透過撮影によるひび割れ状況

図7.2.2～図7.2.4にそれぞれFRCC、HFRCCa及びHFRCCbのX線透過撮影で得られた試験体内部の鉄筋周辺のひび割れ状況を示す。ここで撮影ポイントは、以下の通りである。

- (1) 載荷前
- (2) マトリックスの初期ひび割れ付近（FRCC：引張応力150MPa付近、HFRCC：200MPa付近）
- (3) 鉄筋降伏開始時（歪：約0.2%）
- (4) 歪約0.7%時
- (5) 歪約1.1%時

FRCC試験体では初期ひび割れ時の引張応力がHFRCCのそれと比較して小さかったため、撮影箇所が若干異なる。撮影写真を見ると、中央の鉄筋の両側に造影剤用の孔があり、しっかりと造影剤が充填されていることが見てとれる。又、HFRCCの試験体ではスチールコードがX線を通さないため写真に映っていることがわかる。そのため極めて微細なひび割れの観察は困難であるが前段階の写真と比較して考察を述べる。

まず、初期ひび割れ付近で撮影した写真を見ると、いずれの試験体においても切り欠き部分周辺に第一ひび割れが発生していることがわかる。その後、初期ひび割れを繊維が架橋するため第二、第三のひび割れが形成され、歪が大きくなるにつれて複数のひび割れが発生している。比較検討がしやすい歪1.1%でのひび割れ状況を見ると、いずれの試験体においても鉄筋の節々から複数のひび割れが発生していることが確認できる。又、HFRCCのひび割れ本数はFRCCのそれと比較して多いと観察できる。同歪でのひび割れの本数が多いと言うことは、一本一本のひび割れ幅が小さいことを意味しており、マトリックスとしてHFRCCを使用することでひび割れの微細化を促すことが可能となったと考えられる。い

づれの試験体においても最終的には局所ひび割れが発生したが、FRCC試験体では、歪が1.0%まで達する前に局所ひび割れが拡大してシーリング材が破れたために内部の造影剤が漏れだした試験体があった。そのため、FRCCをマトリックスとした場合、HFRCCの場合と比較して繊維の架橋力が小さいことがわかる。又、HFRCCでは鉄筋のほぼ全ての節々から複数のひび割れが発生しており、鉄筋周辺のひび割れは試験体全体に分散していることがわかる。このため、鉄筋の降伏領域はFRCCのそれと比較して広いと考えられる。又、鉄筋の節から発生しているコーン状のひび割れは所謂「Gotoクラック<sup>3)</sup>」と呼ばれるものである。

又、スチールコードの混入量がより多いHFRCCbでは、歪が1.1%まで進んでも鉄筋周辺のひび割れが試験体表面まで到達していない、もしくは試験体表面に向かうに従いひび割れの幅が狭くなっていることが観察できる。これはポリエチレン繊維では補強しきれない程度のひび割れを、スチールコードがひび割れの拡大を抑えて、進展を妨げたためと考えられる。

### 7.2.2.2 引張応力-歪関係

両引き試験で得られた引張応力-歪関係を図7.2.5に示す。比較のため、鉄筋単体の引張応力-歪関係の平均値も示している。両引き試験の結果において、引張応力が時折極端に低下しているのは、フィルムへの撮影時に载荷を停止して変位が変動しないように制御したためである。図7.2.5を見ると、ポリエチレン繊維のみを混入したFRCCを比較して、2種類の合計が同量の繊維が混入されているHFRCCaのほうが、初期勾配が急であることから鉄筋との複合体の剛性が裸鉄筋のそれよりも高いことがわかる。次に、初期勾配の傾きが変化する箇所があるが、これは初期ひび割れが発生したことを示している。初期ひび割れが発生した後は、鉄筋の引張試験結果に近づく傾向にあるが、FRCCもしくはHFRCC内の繊維が架橋して応力を伝達するため荷重を維持していることがわかる。鉄筋の降伏以降もFRCCもしくはHFRCCが引張応力を伝達しており、鉄筋の降伏点と比較して大幅に高い応力を示していることがわかる。この鉄筋単体の引張応力-歪関係と両引き試験で得られた引張応力-歪関係で囲まれた部分がテンションスティフニング効果として位置付けられる。次項ではこのテンションスティフニング効果について検討を行う。

### 7.2.2.3 テンションスティフニング効果

ここでは、テンションスティフニング効果として、FRCCもしくはHFRCCが負担する引張応力について検討を行う。FRCCもしくはHFRCCが負担する引張応力の算出は以下の通りである。まず、両引き試験で得られた引張応力-歪関係から鉄筋単体の引張荷重を減じ、更に鉄筋の断面積を乗じる。これがFRCCもしくはHFRCCが負担する荷重となる。これを更にFRCCもしくはHFRCC部分の断面積で除したものを引張応力負担分として考えた。算出されたFRCCもしくはHFRCCの引張応力-歪関係を図7.2.6に示す。HFRCCbについては第5章において円柱試験体による直接引張試験を行っているため、その結果も同じグラフに重ねて示した。

FRCC、HFRCCa及びHFRCCbの負担引張応力-歪関係を比較すると、スチールコードが混入されているHFRCCの方がポリエチレン繊維のみ混入されたFRCCと比較して大幅に負担引張応力が增大していることがわかる。HFRCCaについてはFRCCに比べ約1.5倍の最大引張応力を示しており、HFRCCbについては、約2倍の最大引張応力を示している。又、HFRCCbにおいて両引き試験で得られた負担引張応力-歪関

係と円柱試験体により求められた直接引張応力-歪関係を比較すると、降伏点に至るまでの剛性が高い状態を保持し続けている点、及び降伏後のピーク値がより小さな歪の段階で到達している点が注目される他には、ほぼ同程度の挙動が得られていることが確認できる。このことから、両引き試験体のような構造要素の性能としては、その剛性保持能力と強度特性の優位性の点から、FRCCよりもHFRCCが適していると考えられる。また、性能予測の面では、鉄筋単体の引張応力-歪関係とマトリックスとなるFRCCの引張応力-歪関係を足し合わせることで概算が可能であると考えられる。しかしながら、HFRCCにおいて、両引き試験で得られた引張応力の方が全体的に若干高い値を示していることがわかる。更に、鉄筋の降伏点歪約0.2%において大幅な引張応力の低下が確認できる。上記した二点についてそのメカニズムの考察をする。

まず、引張応力の増加現象であるが、鉄筋の応力を過小評価していないとすれば、HFRCCにおける引張応力の負担分がなんらかの理由で直接引張試験で得られた引張応力に対して見掛け上の増強効果が存在することを意味している。

その一つとして考えられるのが、鋼管コンクリート構造などでよく指摘される「たが効果」（あるいはコンファインド効果）がHFRCCの場合でも疑似的に作用しているということである。RCにおいて鉄筋に軸力が付加されると節からの支圧力によって、コンクリートにコーン状ひび割れが進展する。一方、鋼管コンクリートの場合は鋼管がコンクリートを拘束するため、鉄筋からの支圧力に対して、コンクリートに圧縮応力が発生し、2軸圧縮応力の下でひび割れ発生応力が上昇するために、引張強度は見掛け上増大する<sup>3)</sup>。鋼管を用いず、HFRCCをコンクリートの代わりに用いた場合、HFRCCはある程度の引張力に耐えるため、ひび割れの進展していない領域において、HFRCCが鋼管と同様の拘束効果を発揮し、内部のHFRCCを拘束することが考えられる。X線透過撮影により得られた写真を見ると、HFRCCでは大きな歪まで変形した場合でも、節々のひび割れは試験体表面まで到達していないことが確認できた。そのため、ここで挙げた「たが効果」の鋼管にあたるひび割れが発生していないHFRCCの外周部分の領域が広いこと、大きな歪においても増強効果が得られたものと考えられる。

次に、鉄筋の降伏点付近における引張応力の急激な低減については、第6章で示したメカニズムと同様のものによると考えられる。



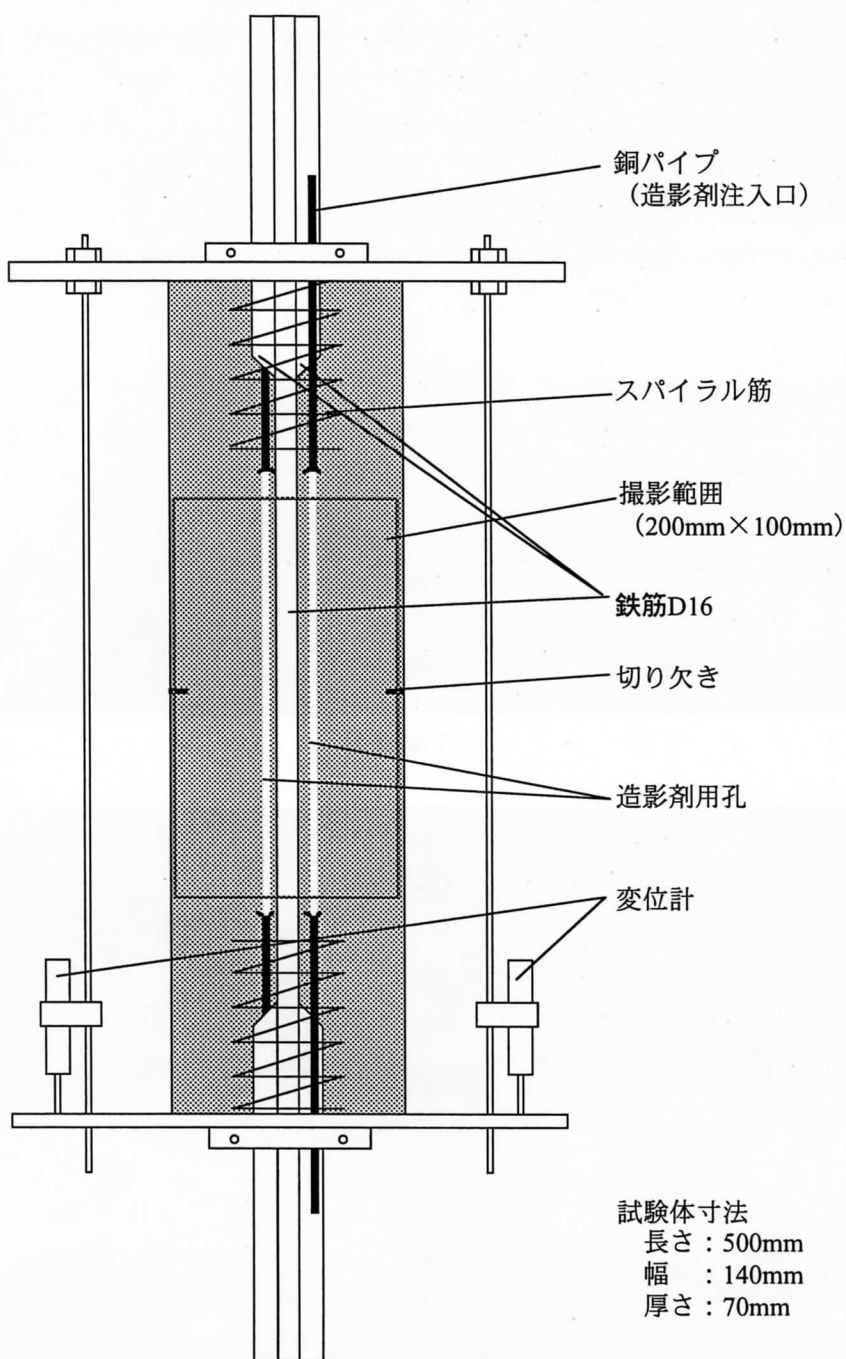
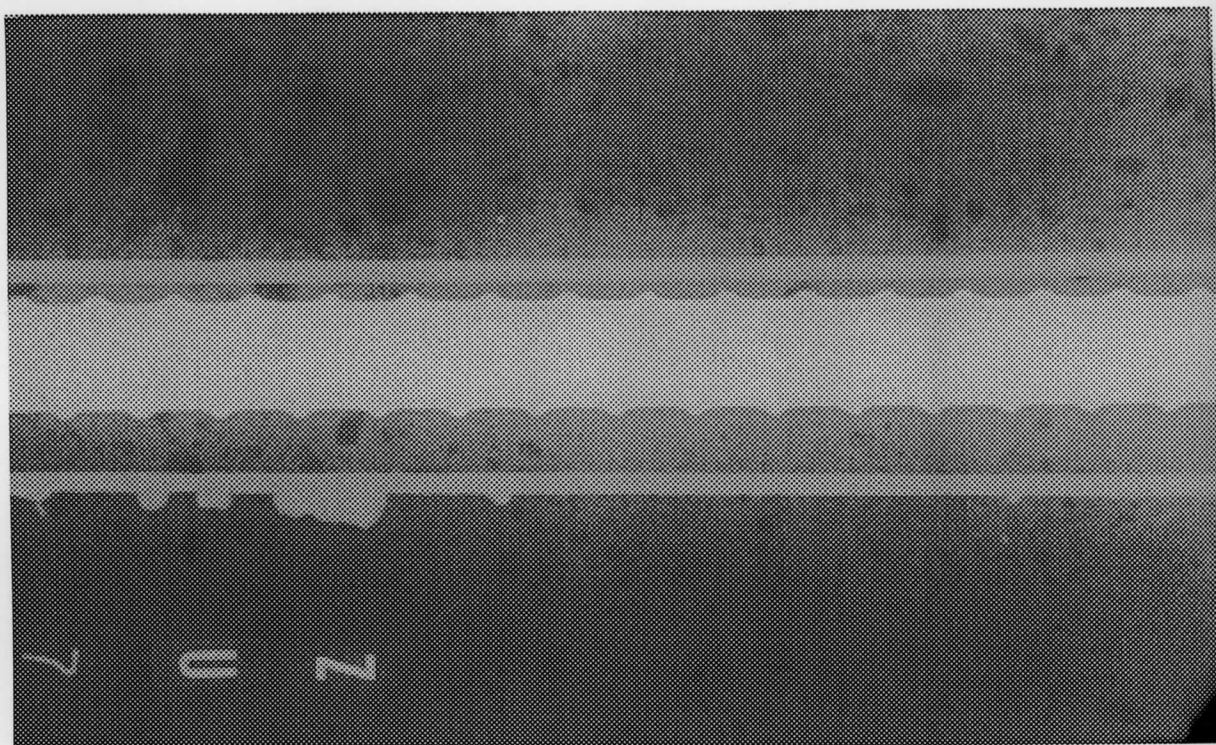
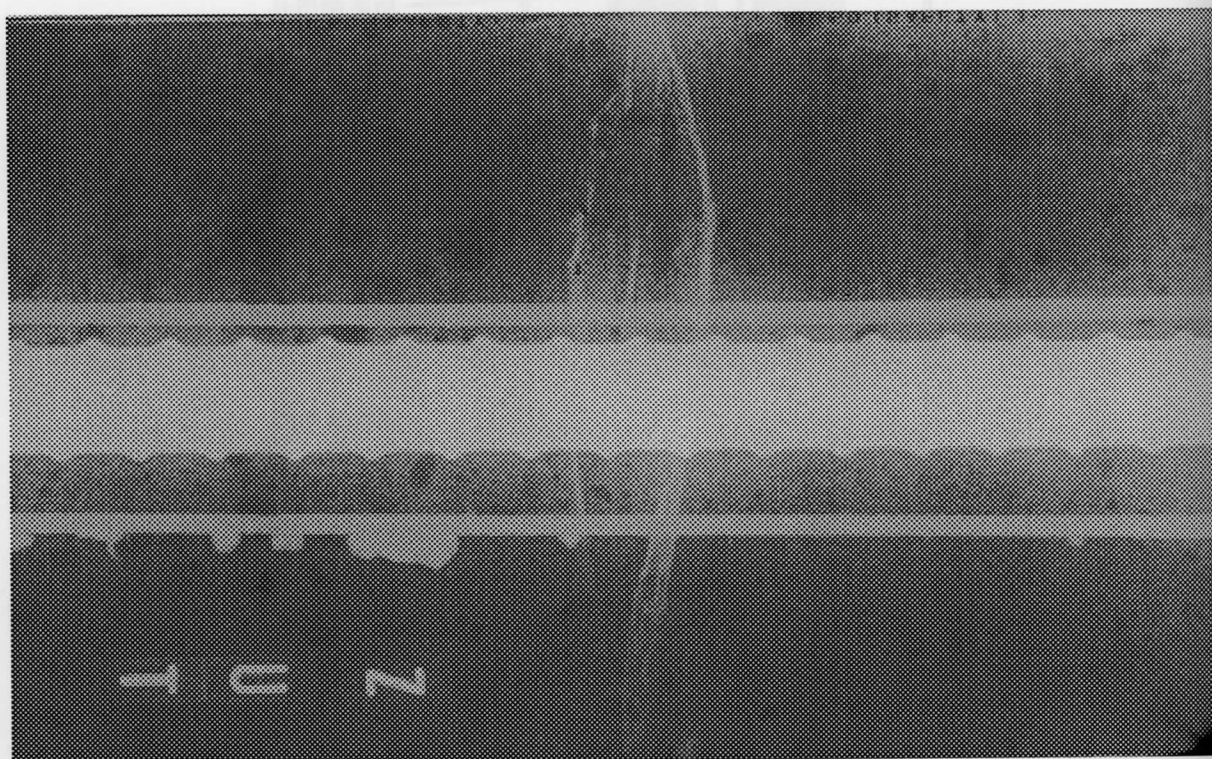


図7.2.1 両引き試験体概要図

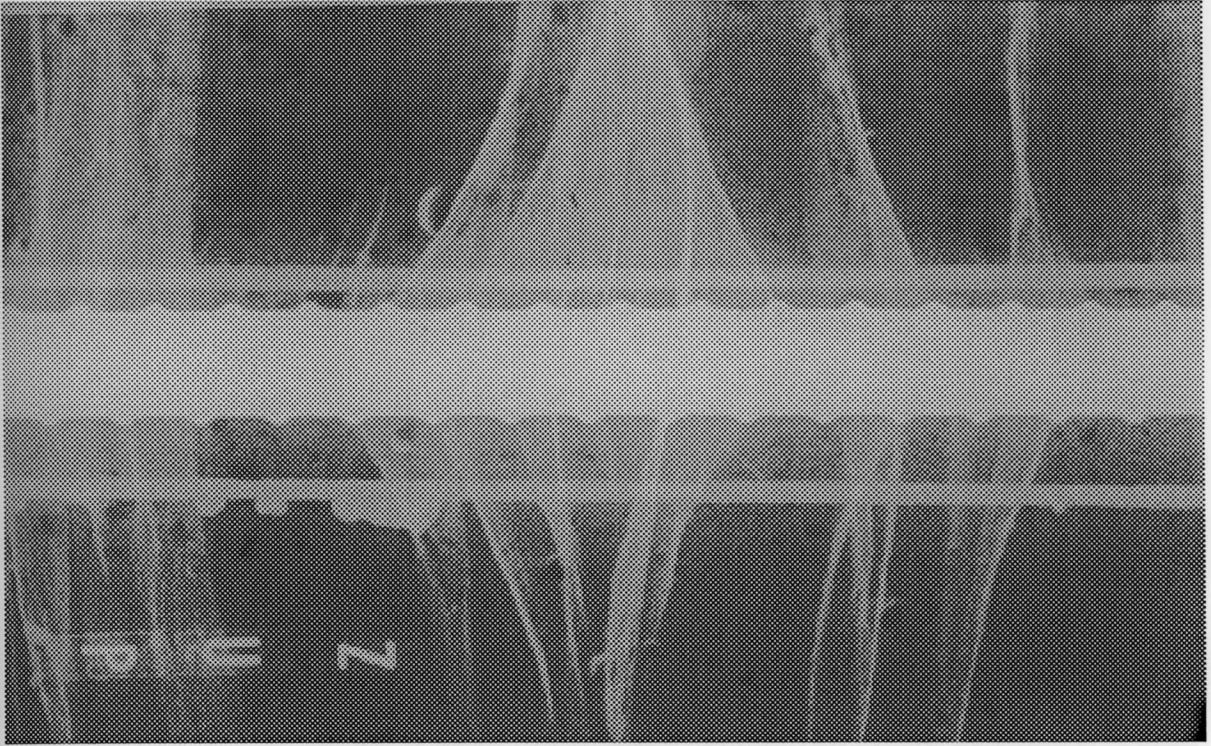


(1) 載荷前

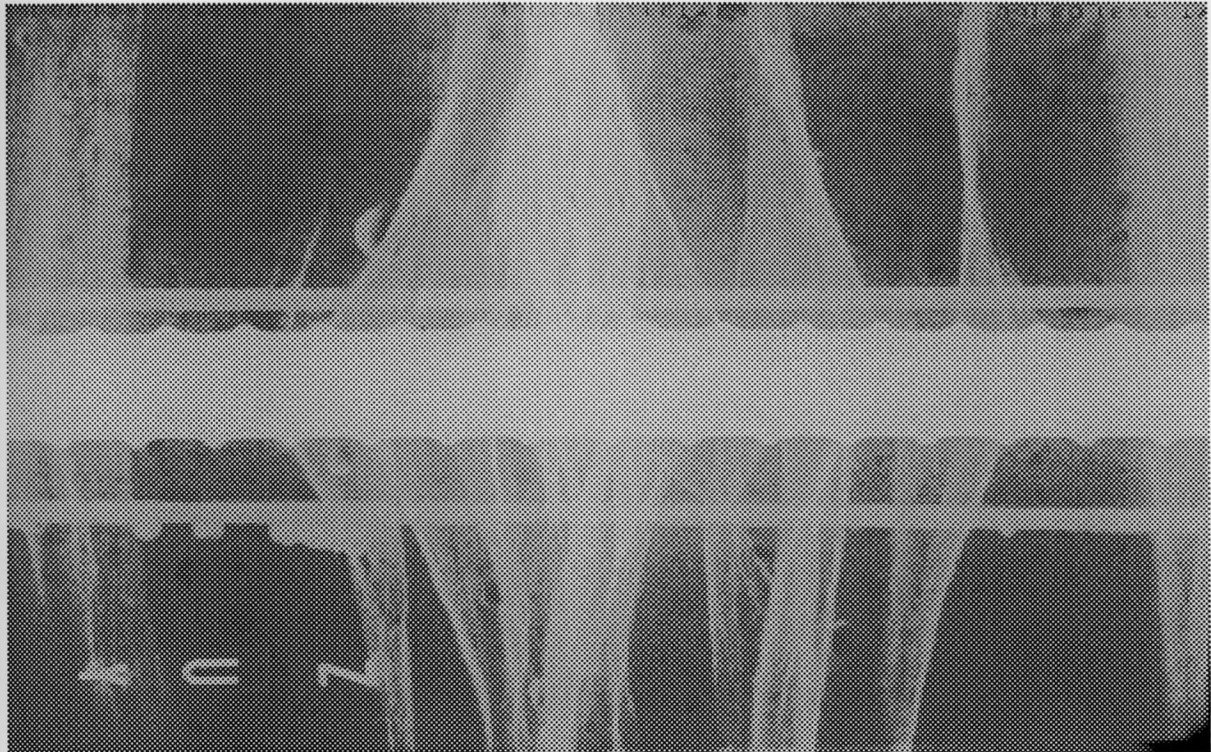


(2) マトリックス初期ひび割れ付近

図7.2.2 ひび割れ状況 (FRCC)



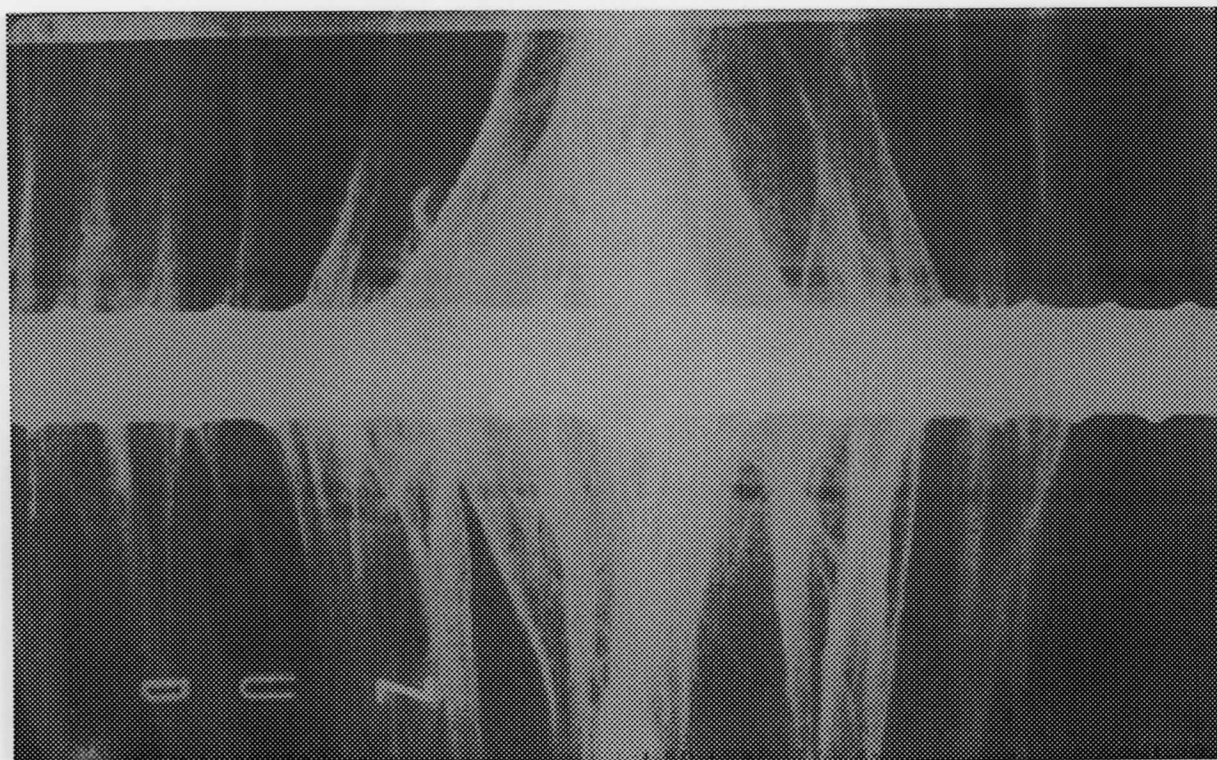
(3)降伏開始時



(4)歪0.7%

図7.2.2 ひび割れ状況 (FRCC)

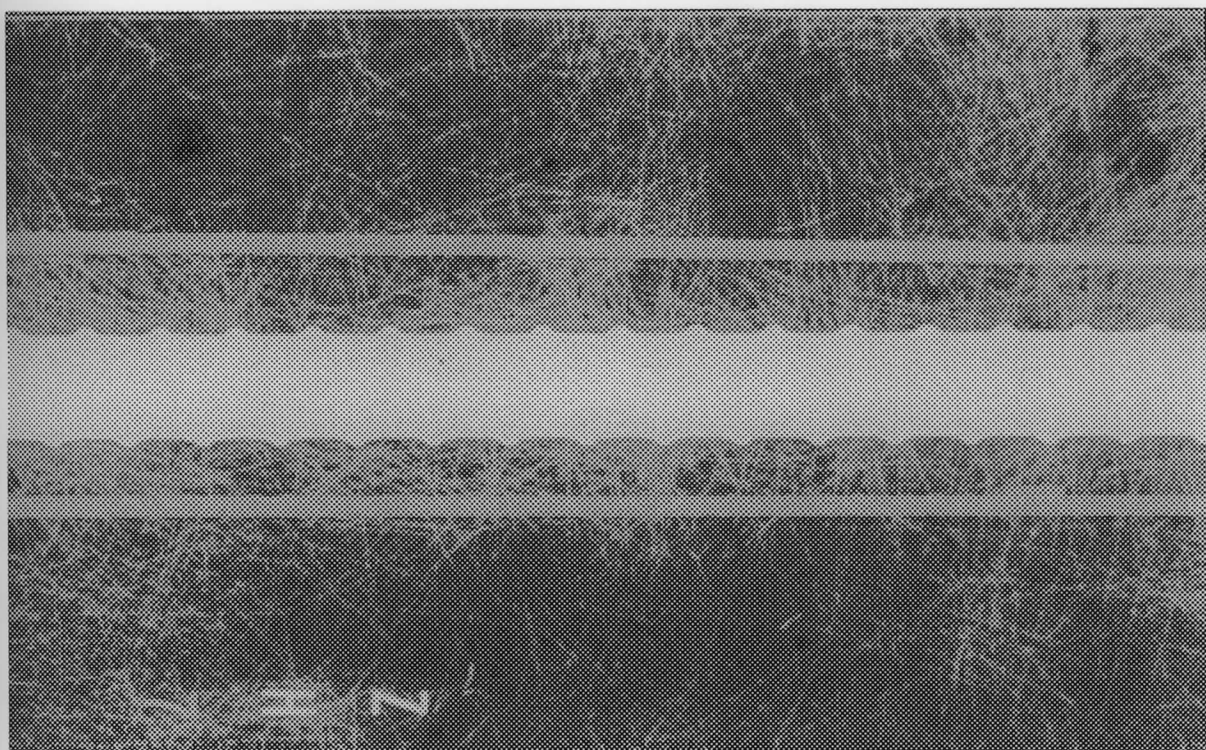




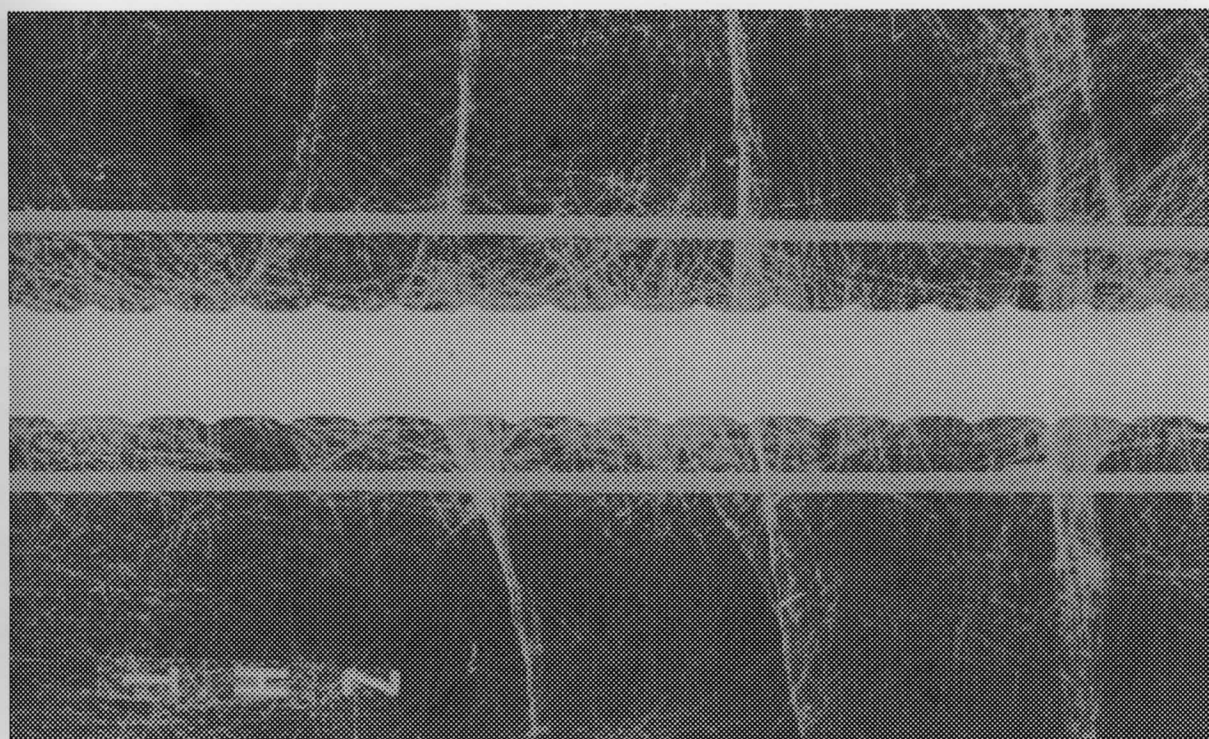
(5)歪1.1%

図7.2.2 ひび割れ状況 (FRCC)





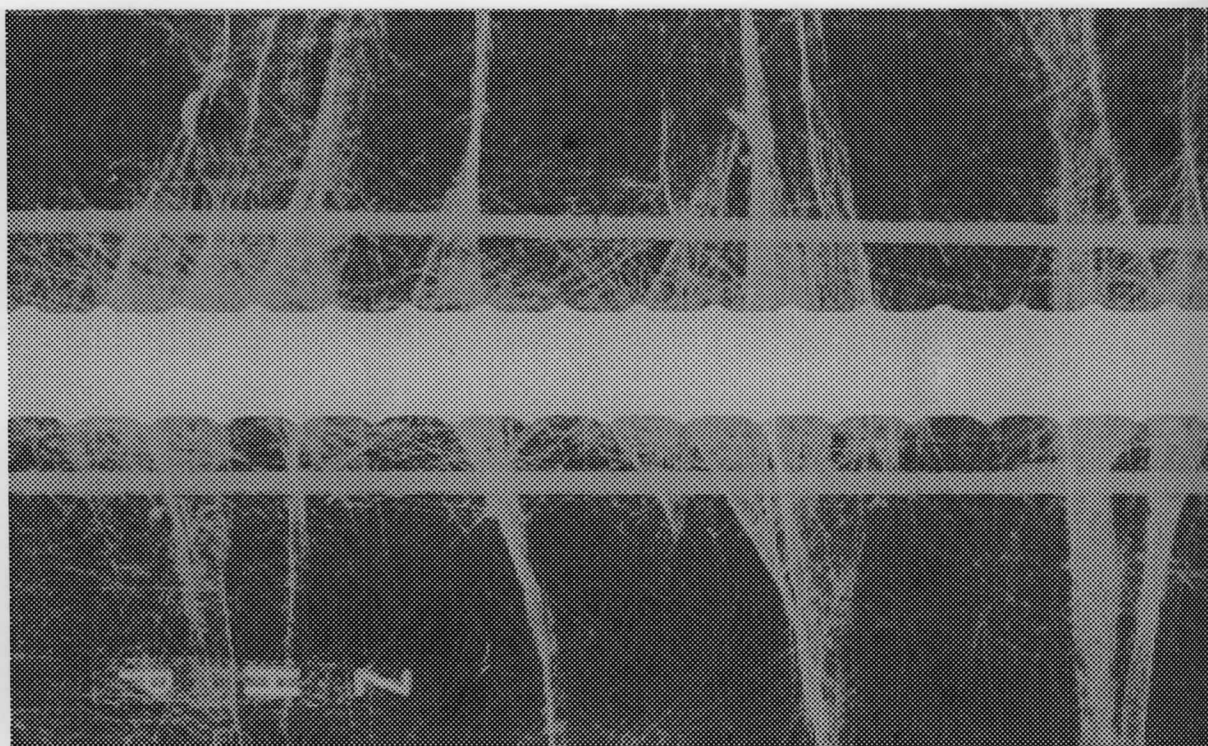
(1) 載荷前



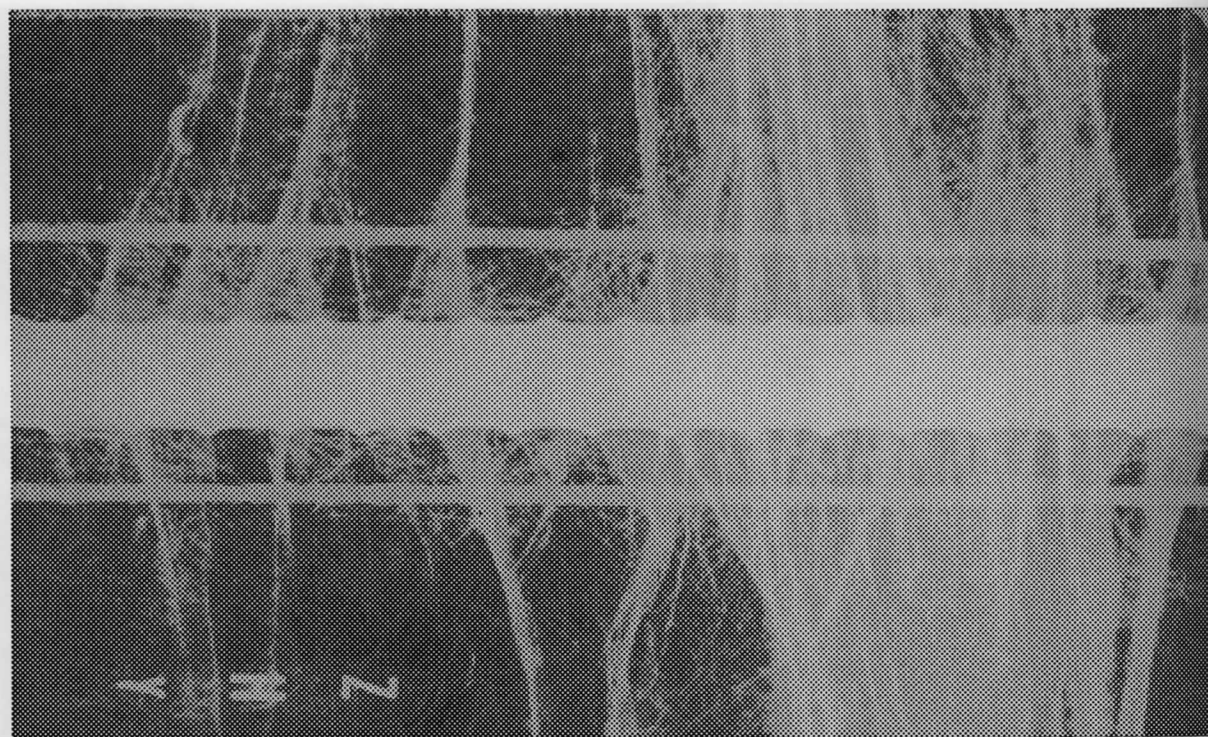
(2) マトリックス初期ひび割れ付近

図 7.2.3 ひび割れ状況 (HFRCCa)





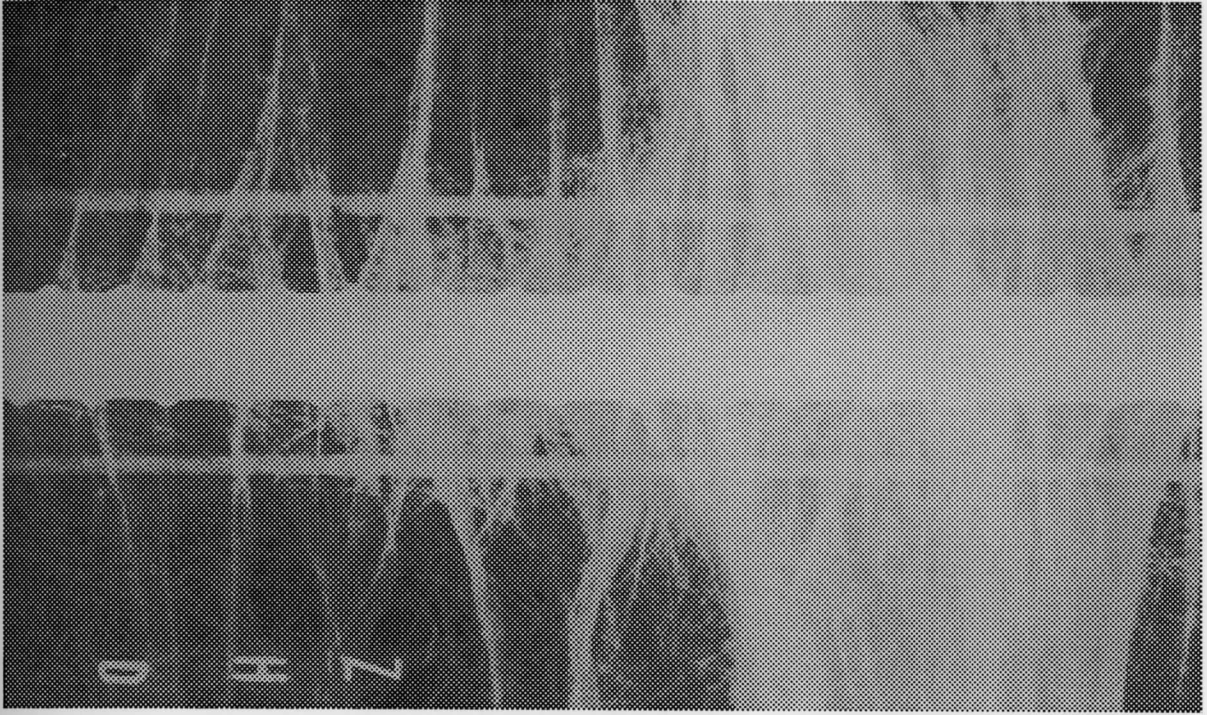
(3)降伏開始時



(4)歪0.7%

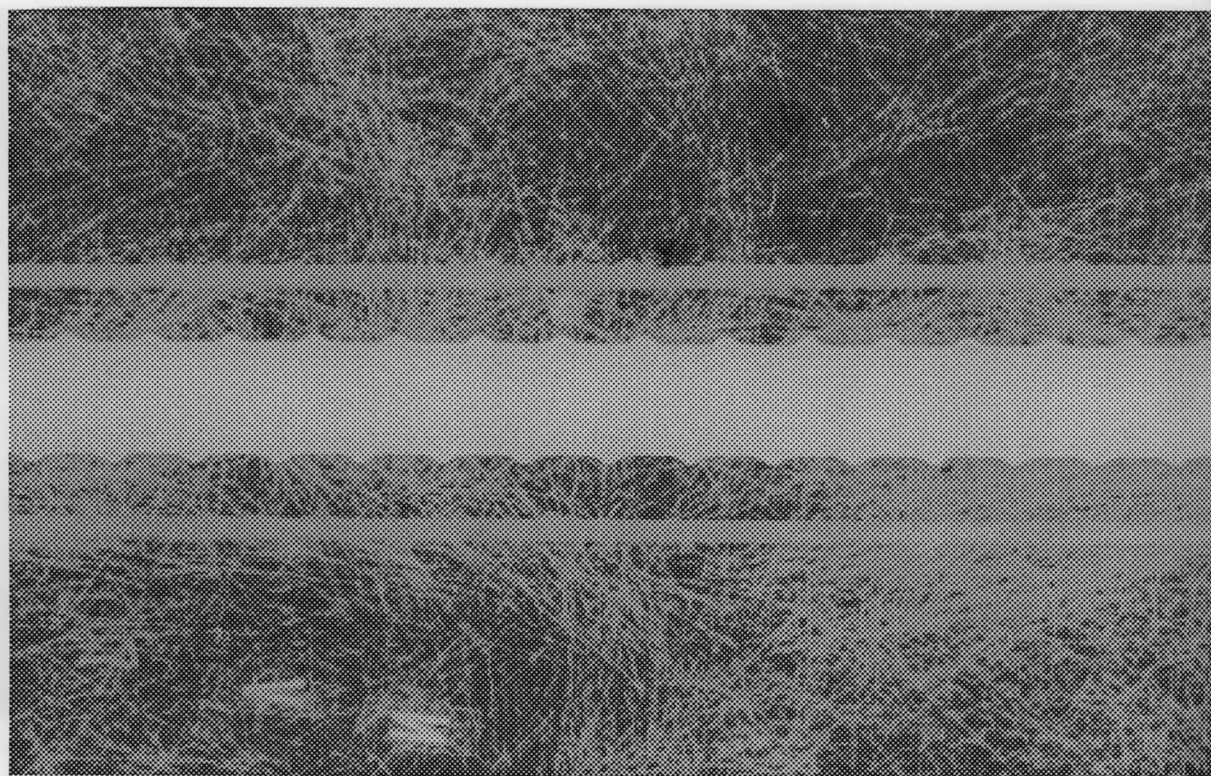
図7.2.3 ひび割れ状況 (HFRCCa)



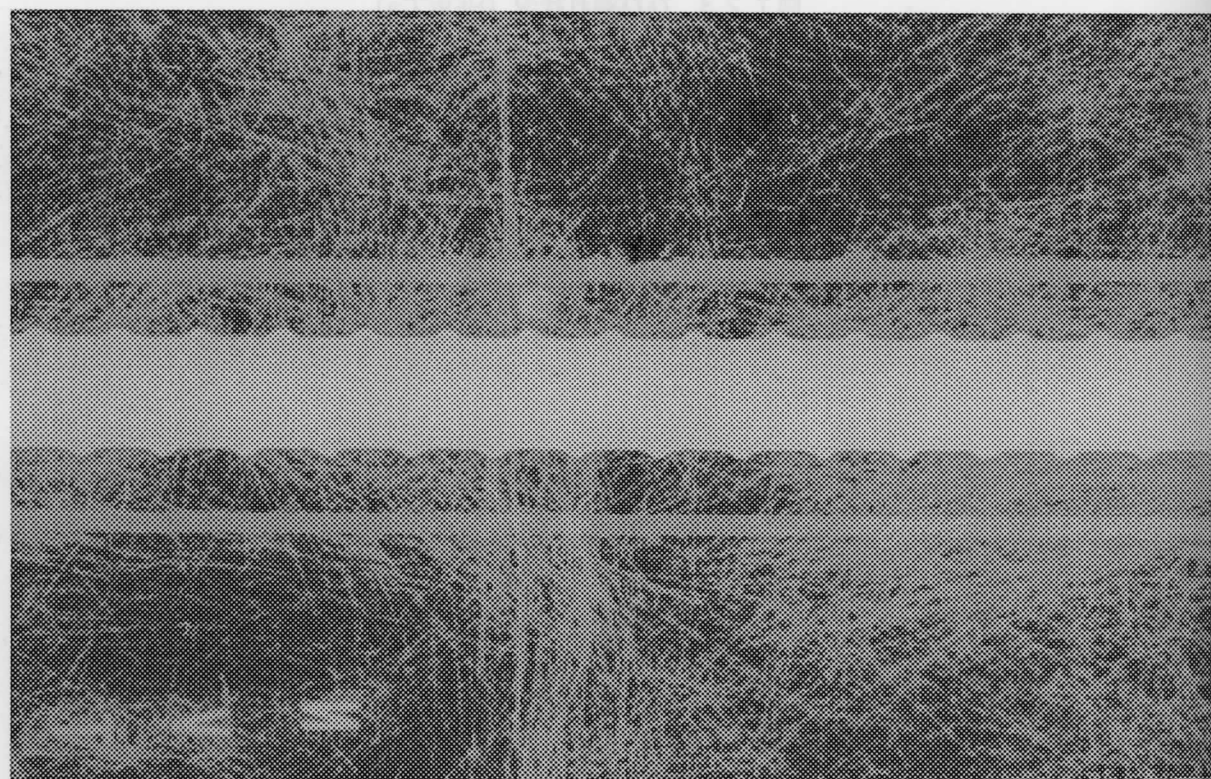


(5)歪1.1%

図 7.2.3 ひび割れ状況 (HFRCCa)



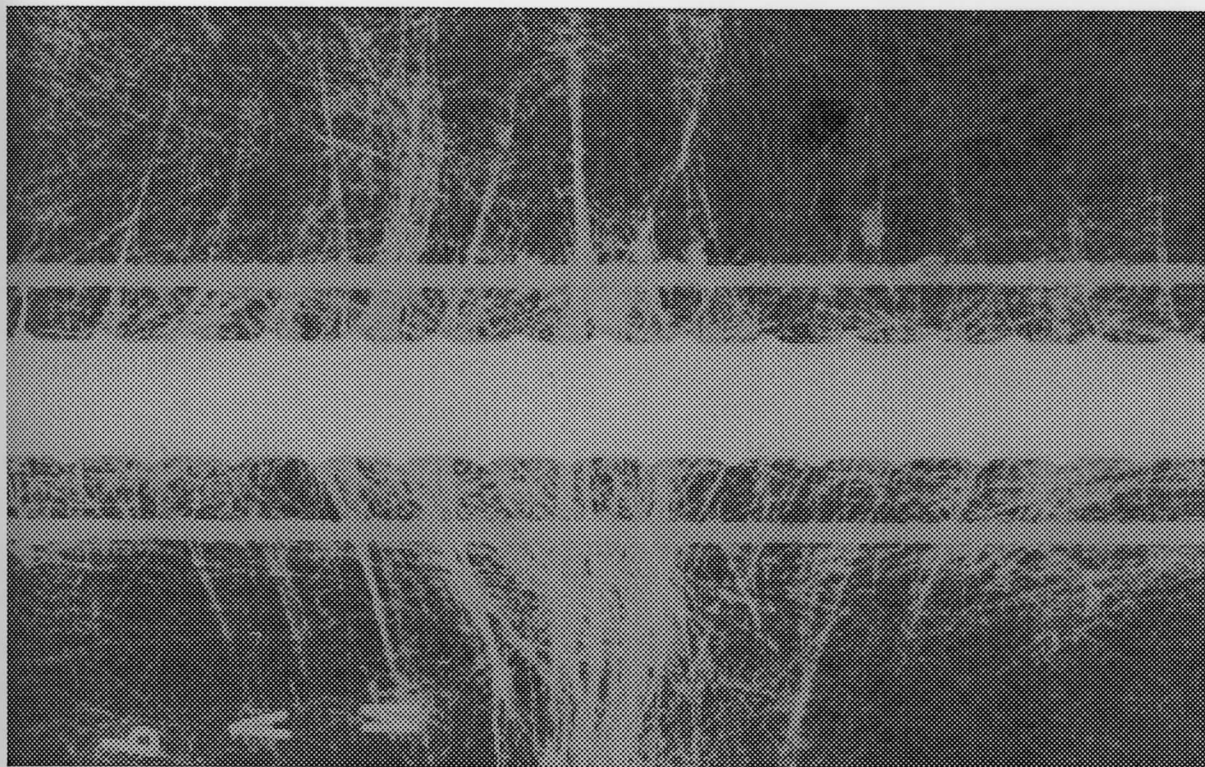
(1) 載荷前



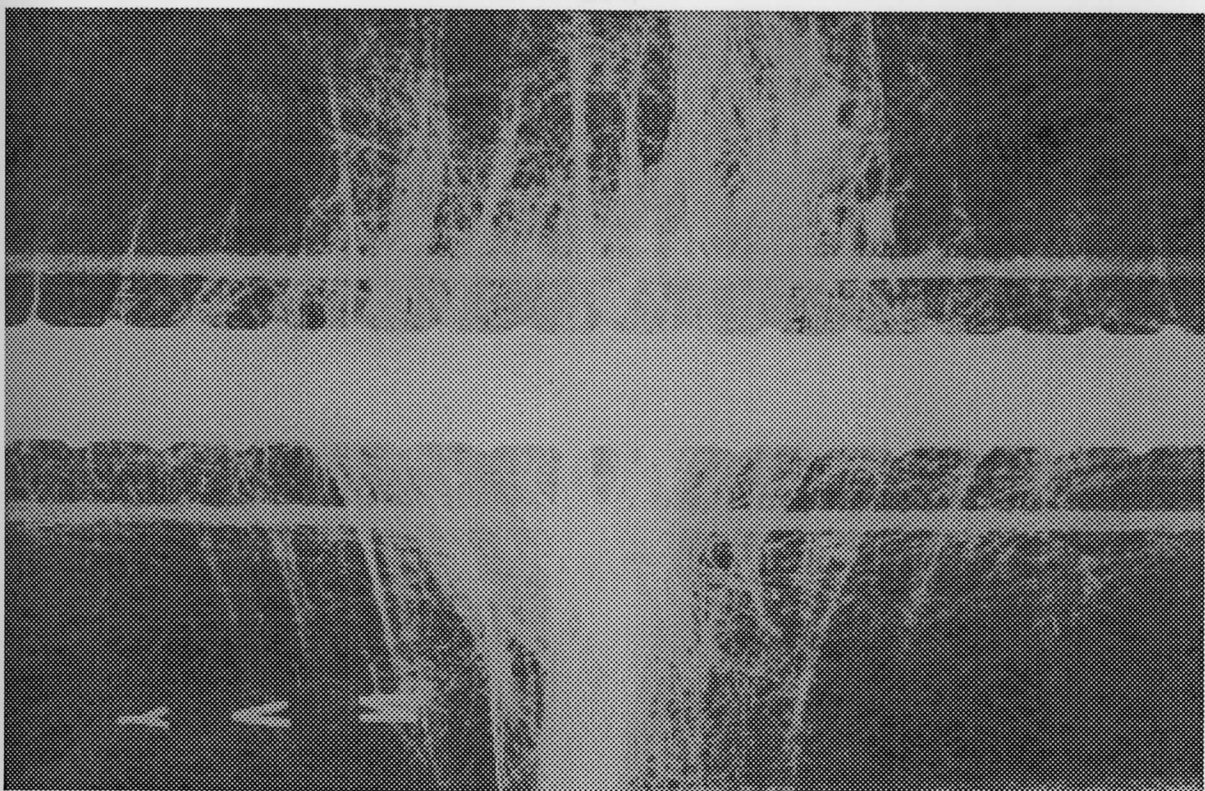
(2) マトリックス初期ひび割れ付近

図7.2.4 ひび割れ状況 (HFRCCb)



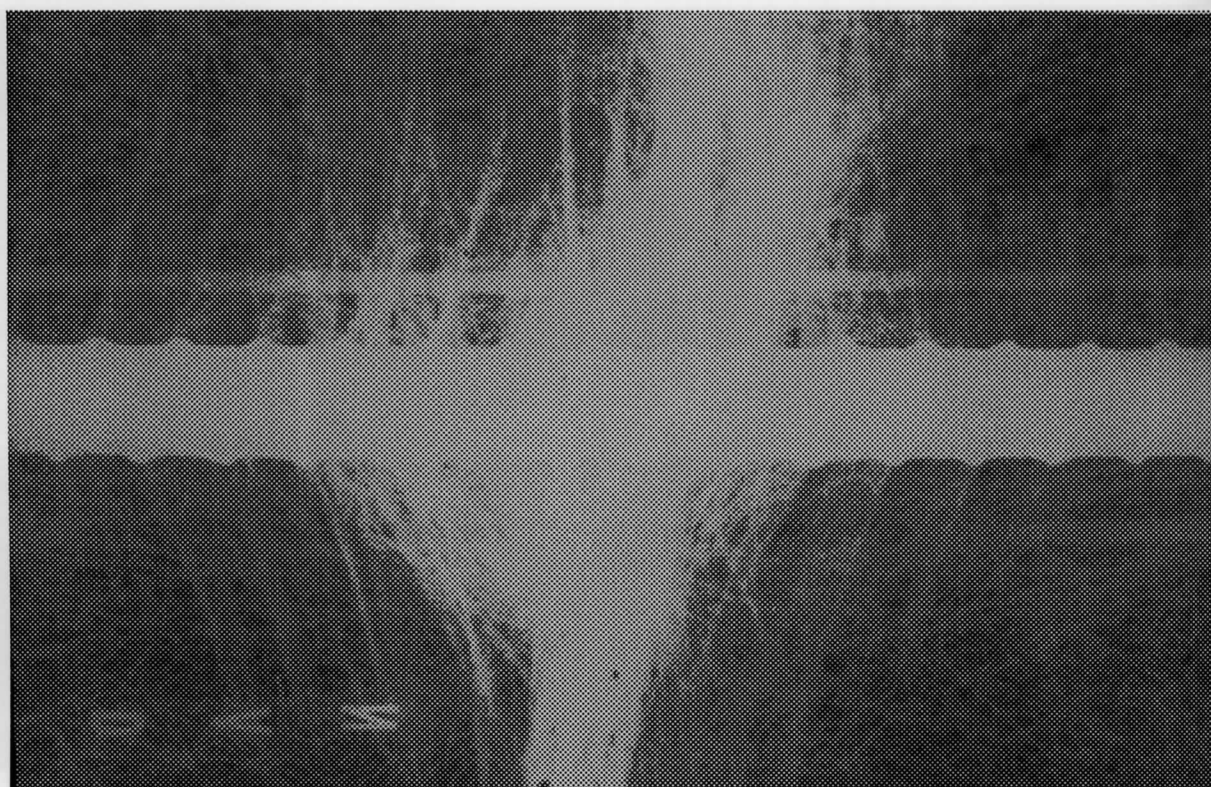


(3)降伏開始時



(4)歪0.7%

図7.2.4 ひび割れ状況 (HFRCCb)



(5)歪1.1%

図7.2.4 ひび割れ状況 (HFRCCb)

(F)歪0.7%

図7.2.4 ひび割れ状況 (HFRCCb)

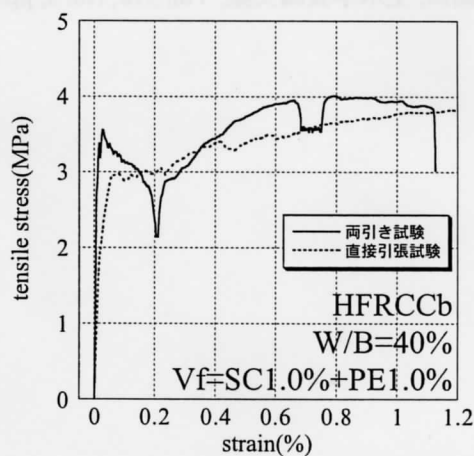
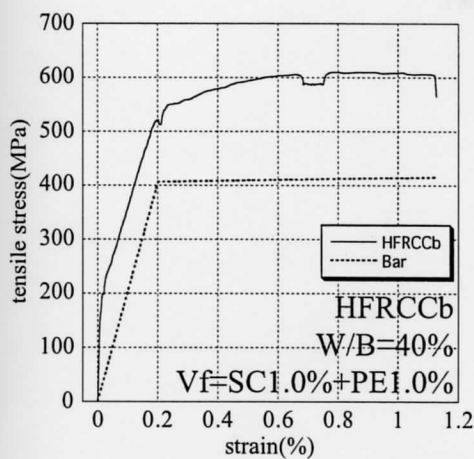
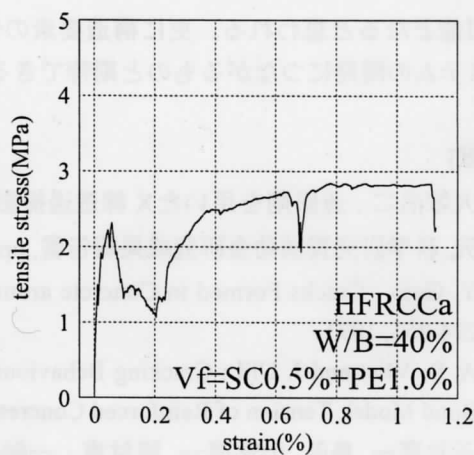
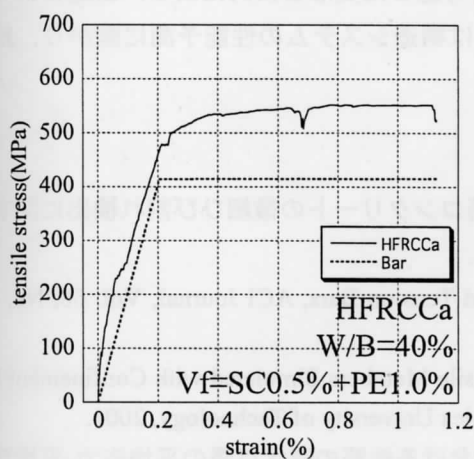
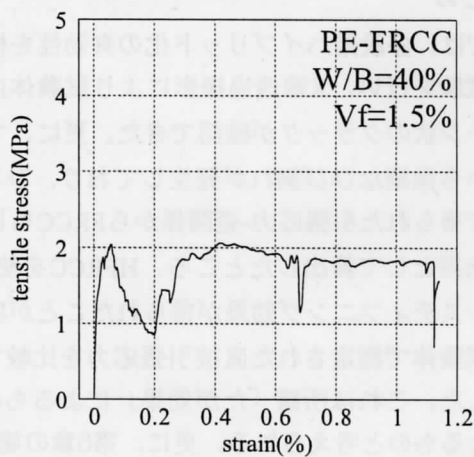
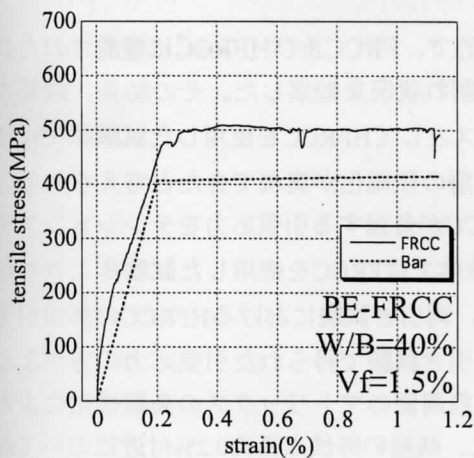


図7.2.5 両引き試験により得られた引張応力-歪関係

図7.2.6 HFRCCの負担引張応力-歪関係

### 7.3 まとめ

本章では、多段階ハイブリッド化の有効性を検証する目的で、FRCC及びHFRCCに埋設された鉄筋の両引き試験を行い、X線透過撮影により試験体内部のひび割れ状況を観察した。その結果、鉄筋の節々からコーン状のクラックが確認できた。更に、マトリックスとしてHFRCCを使用した試験体ではほぼ全ての節から微細なひび割れが発生しており、ひび割れの一層の微細化が実現できたと考えられる。両引き試験で得られた引張応力-歪関係からFRCCもしくはHFRCCが負担する引張応力をテンションスティフニング効果として算出したところ、HFRCCを使用した試験体ではFRCCを使用した試験体よりも高いテンションスティフニング効果が得られたことが確認できた。両引き試験におけるHFRCCの負担引張応力と円柱試験体で測定された直接引張応力を比較すると、両引き試験で得られた引張応力の方がより高い値を示した。これは所謂「たが効果」によるもの、即ち鉄筋周囲のマトリックスの高靱性化による拘束効果によるものと考えられる。更に、第6章の場合と同様に、鉄筋の降伏点歪約0.2%付近において鉄筋の負担応力を過大評価しているものと考えられる。この2点を考慮した更なる検討により、構造要素の性能予測は可能となると思われる。更に構造要素の性能の把握は構造システムの性能予測に繋がり、新たな構造システムの開発につながるものと期待できる。

#### [参考文献]

- 1) 大塚浩二：造影剤を用いたX線透過撮影による鉄筋コンクリートの微細ひび割れ検出に関する研究, 科学研究費補助金研究成果報告書, pp. 9-14, 1991.
- 2) Y. Goto : Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars, ACI Journal, Vol. 68, No. 4, pp. 224-251, 1971.
- 3) A. B. Vliet and J. Uijl : Cracking Behaviour of RC Tensile Members Simulated with Confinement Based Bond Model, Tension of Reinforced Concrete Prisms, Lulea University of Technology, 2001.
- 4) 玉井真一, 島弘, 出雲淳一, 岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以降の平均応力-平均ひずみ関係, 土木学会論文集, Vol. 378, No. 5, pp. 239-247, 1987.



## 第8章 せん断加力を受ける梁のひび割れ挙動と変形特性

### 8.1 はじめに

鉄筋コンクリート造梁の力学的挙動の中でもせん断破壊は、変形が斜張力の卓越するある限定された領域に集中する局所的なひずみによって引き起こされ、変形性能の小さい鉄筋コンクリートの場合には、脆的な挙動を示す。従って所定の靱性を付与することは、耐震安全性をより高くするためには重要である。

本報告書第 I 部では、合成繊維及び特殊加工されたスチールコードを混入したハイブリット型繊維補強セメント系複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites: HFRCC)は、従来のセメント系複合材料と比べて極めて優れたひび割れ抵抗性を示すことが明らかにされた。そこでせん断加力を受ける梁にこの HFRCC を適用することによる部材のせん断破壊挙動への影響と、それに関連の強い試験体内部のひび割れ状況を明らかにすることが、本章の目的である。

鉄筋コンクリート梁のせん断破壊に関する実験的研究は、1970 年代初め以来数多くなされているが、梁のせん断スパン比やコンクリートの圧縮強度などの影響に着目した構造的なものと、せん断補強（横補強）筋の影響に着目したものの 2 つに大別される。それらの中には、鋼繊維補強コンクリートがせん断補強筋の効果を補うものとしてせん断補強筋に有効に作用することを明らかにした実験的研究も報告されている[1]。

本章では HFRCC を使用して、①スチールコード混入の有無、②スチールコード混入率の違い、③試験体中央部分のせん断補強筋の有無、の影響の 3 つの観点から、せん断ひび割れの発生及び進展状況を X 線透過撮影により視覚的に観察し、荷重-相対変位曲線の形状との比較検討を行うことを目的とする。

### 8.2 実験概要

#### 8.2.1 使用材料

以下に本実験に使用した材料を示す。

早強ポルトランドセメント(C)、シリカフューム(SF)、接着剤用珪砂 7 号(S)、高性能減水剤、ポリエチレン繊維 (PE: 繊維長 6mm, 繊維径  $12\mu\text{m}$ , 引張強度 2770MPa, 引張弾性係数 88GPa)、スチールコード(SC: カット長さ 32mm)、主筋: D10 (SD30A)、せん断補強筋: 丸鋼 ( $\phi 4$ )、X 線造影剤: 炭化セシウム水溶液 (濃度 50%)、シーリング剤: シリコンシーラントセメダイン 8060。

#### 8.2.2 調合

HFRCC 及び FRCC 各実験シリーズの調合を表 8.2.1 に示す。基本的調合は HA-1.5 とし、目的で示した①[スチールコード混入の有無]の影響を検討する方法としてスチールコードの繊維混入量を PE に置換した PA-1.5、②[スチールコード混入率の違い]の影響を検討する方法としては、スチールコードを、HA-1.5 と比べて  $V_f=0.5\%$  増量した HA-2.0 を用意した。

表 8.2.1 調合

シリーズ各	W/B (wt. %)	SF/B (wt. %)	S/B (wt. %)	繊維混入量 (Vol. %)	
				SC	PE
PA-1.5	40	20	40	—	1.5
HA-1.5				0.5	1.0
HB-1.5				0.5	1.0
HA-2.0				1.0	1.0

$B=C+SF$

8.2.3 試験体作製方法

試験体の概要図を図 8.2.1 に示す。練り混ぜにはオムニミキサー（容量:10ℓ）を用いた。セメント、砂及びシリカフュームを入れ 1 分間空練りし、その後水及び減水剤を投入し 3 分間練り混ぜ、更に繊維を投入し 5 分間練り混ぜた。練り混ぜ後、型枠に流し込み、気泡が含まれないように十分に振動を加え、成形した。打ち込み後、養生室内（温度 20℃、相対湿度 94℃以上）にて 1 日湿空養生を行い、その後脱型して標準養生（20℃水中養生）の後、打ち込み後 1 週間にて载荷を行った。試験体には X 線透過撮影用の造影剤を充填するための孔を鉄筋に平行に設けた。試験体内には、試験体中央部分 100mm 以外にせん断補強筋を配置して、X 線観察領域外での破壊を防いだ。また、本研究の目的である③[試験体中央部分のせん断補強筋の有無]の影響を検討するために、中央部分に 1 組のせん断補強筋を配した HB-1.5 を用意した。これを B シリーズとし、他の 3 調合を A シリーズとする。試験体数は各 2 体とした。また、試験中造影剤の漏洩を防止するため、養生終了後に試験体表面にシーリングを施した。

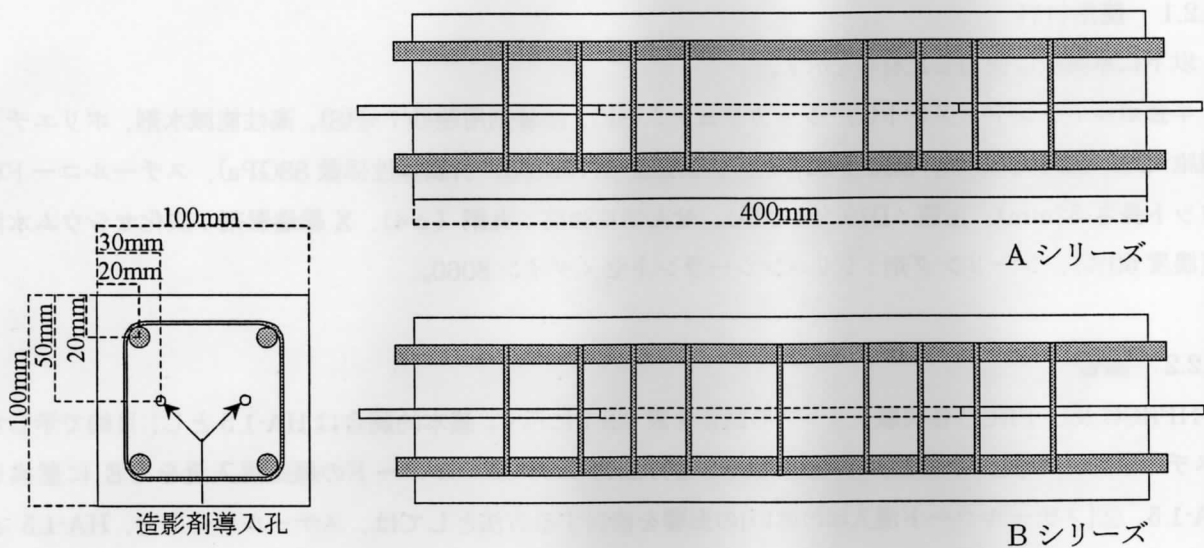


図 8.2.1 試験体概要

8.2.4 試験方法

試験体の設定概要を図 8.2.2 に示す。本実験では、大野式せん断加力実験を行った。試験体には予め孔を設け、造影剤を載荷前に孔に充填しておく。試験は万能試験機を用い、0.2mm/min の載荷速度で変位制御により行った。X 線透過撮影は、載荷前、初期ひび割れ、相対変位約 1mm、2mm、3mm 時の計 5 回行った。相対変位は図 8.2.2 に示す(イ)、(ロ) の位置で測定した。

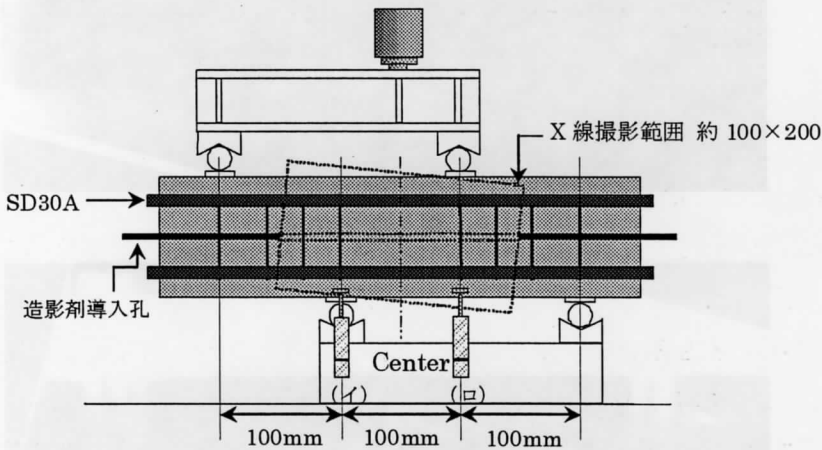


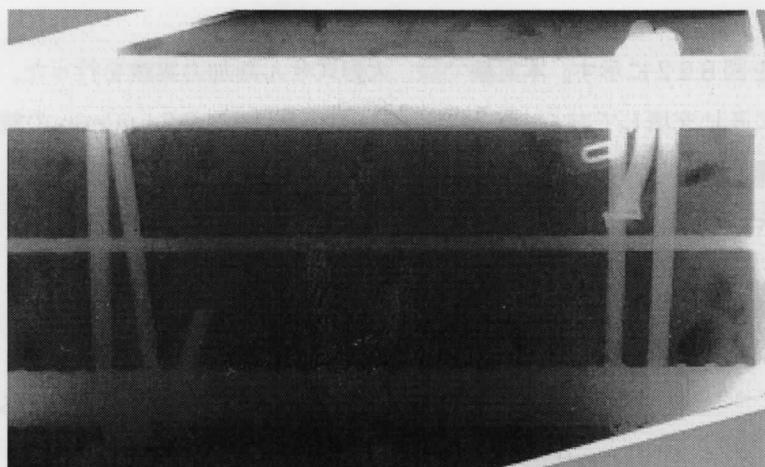
図 8.2.2 せん断試験概要

8.3 X 線透過撮影による微細せん断ひび割れの検出及び考察

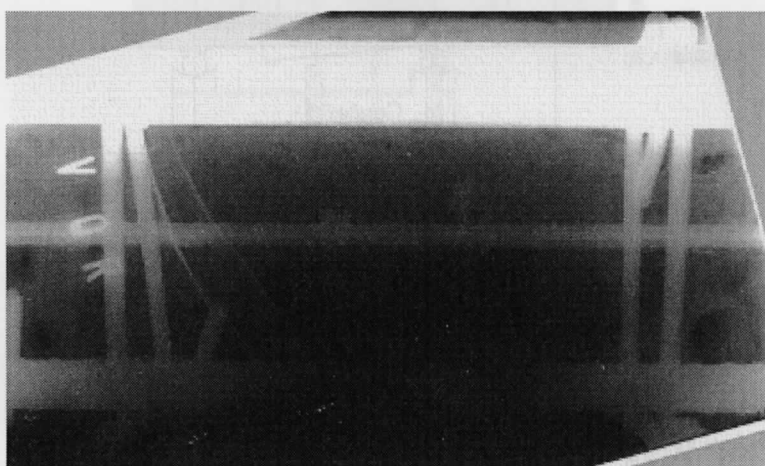
試験によって撮影された X 線透過写真を図 8.3.1～図 8.3.8 に示す。例えば図 8.3.1 は、表 8.3.1 に示す荷重と相対変位時のひび割れ状況を撮影したものである。ただし、PA-1.5-2、HA-1.5-1 並びに HB1.5-1 は約 2mm 時点でひび割れが進展し、造影剤が漏れ出したために、3mm 時での撮影は不可能だった。

(1) せん断ひび割れ挙動に及ぼすスチールコード混入の影響

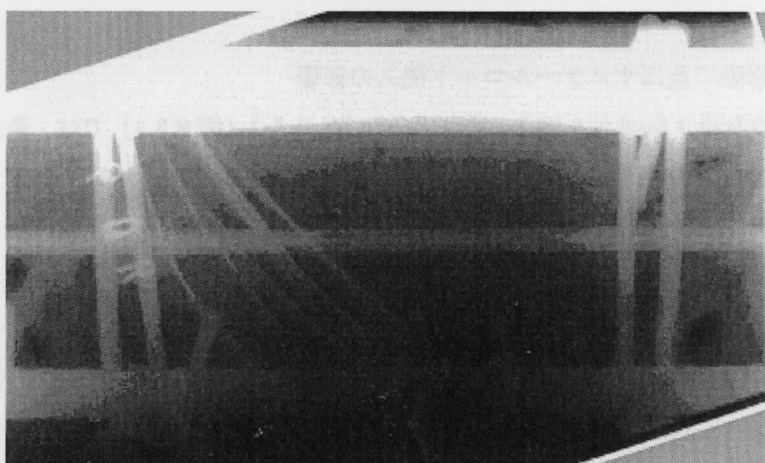
ポリエチレン繊維のみを 1.5vol.% を混入した FRCC : PA-1.5-1 (図 8.3.1) では、最大荷重の約 59% で主筋から約 50～70 度傾斜した曲げせん断的なひび割れを生じている。更に最大荷重の約 70% 程度まで荷重レベルが上昇すると、主筋に対して約 45 度の角度をなす典型的なせん断ひび割れが次第にその数を増やしてくる。更に最大荷重の約 92% まで荷重レベルが上昇すると、せん断ひび割れが広範囲に広がり、載荷点及び反力点各々に対応する位置に設けられた各々の主筋との交点から約 45 度に交わるせん断ひび割れが次第に卓越して損傷が局所化していく様子が観察される。但し、各々 2 本の主筋とせん断補強筋で囲まれた長方形のせん断パネル領域の右上方の三角形部分にはせん断ひび割れの発生は見られない。それに対して、ポリエチレン繊維 1.0vol.% とスチールコード 0.5vol.% を混入したハイブリット型 FRCC (HFRCC) : HA-1.5 では、最大荷重の約 43～47% の段階で 1～2 本の明確なせん断ひび割れが形成され、荷重の増大に伴ってそれらのせん断ひび割れを中心に、それらと平行した微細ひび割れの数が増大する傾向を示す。これは、第 7 章で観察されたように、HFRCC と異形鉄筋との相乗効果による引張抵抗力の増大の結果であると考えられる。



(1) 最大荷重の 0%

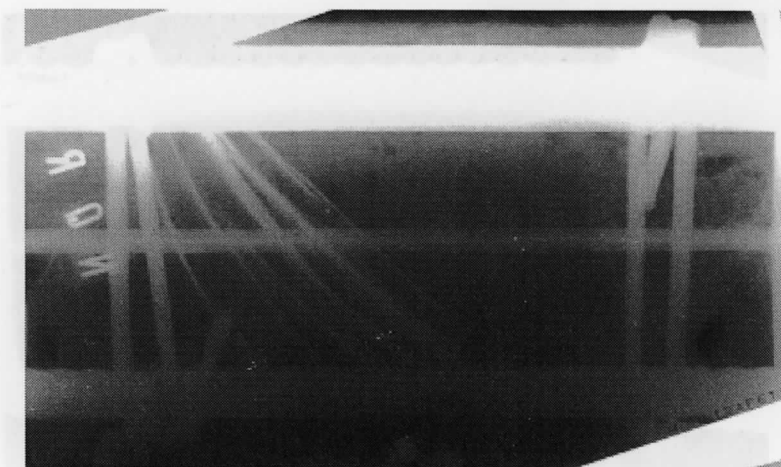


(2) 最大荷重の約 59%

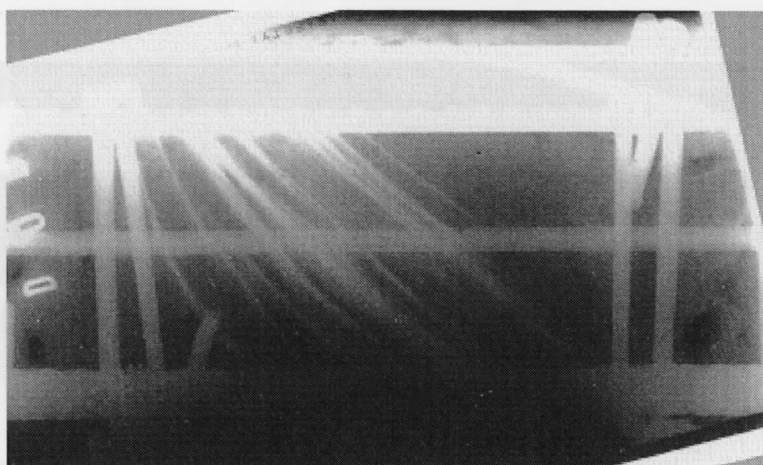


(3) 最大荷重の約 70%

図 8.3.1 X 線写真 (PA-1.5-1)



(4) 最大荷重の約 79%

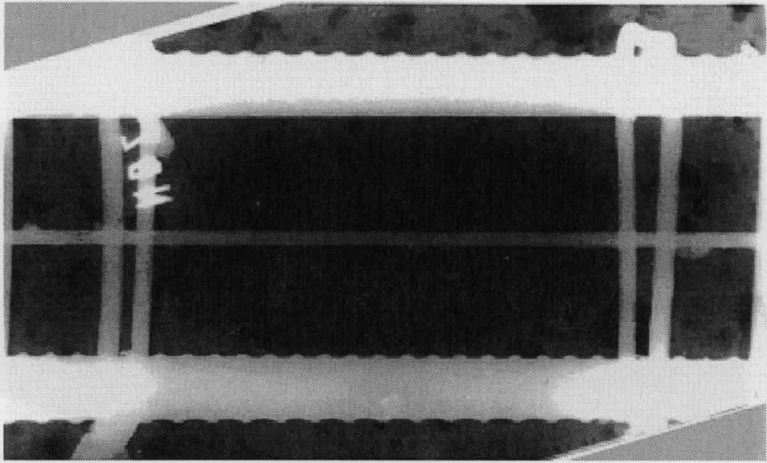


(5) 最大荷重の約 92%

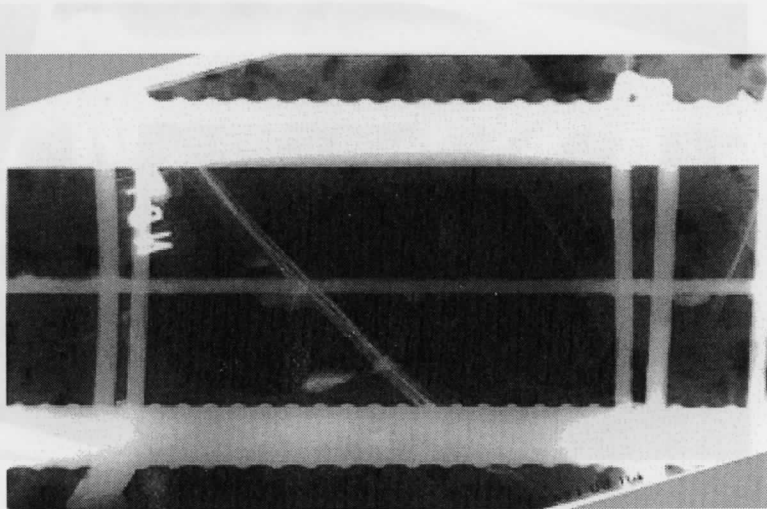
図 8.3.1 (PA-1.5-1)

表 8.3.1 (PA-1.5-1)

撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	59	90	0.76
3	70	107	1.00
4	79	121	1.54
5	92	141	2.00



(1) 最大荷重の 0%

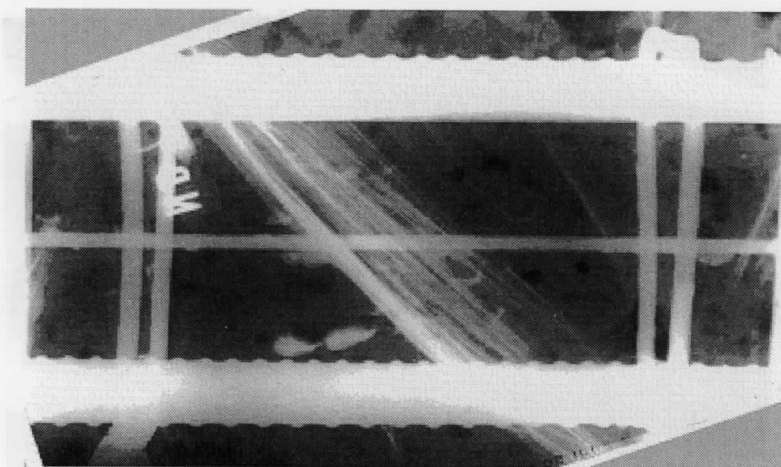


(2) 最大荷重の約 47%

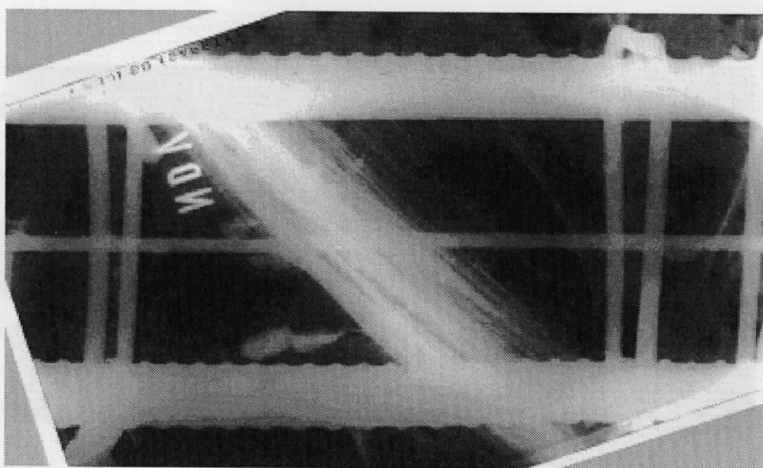
図 8.3.2 X線写真 (PA-1.5-2)

位置 (mm)	1	2	3	4	5
0.0	0	0	0	0	0
0.78	80	88	90	92	94
1.00	107	107	107	107	107
1.24	121	121	121	121	121
1.50	141	141	141	141	141





(3) 最大荷重の約 90%

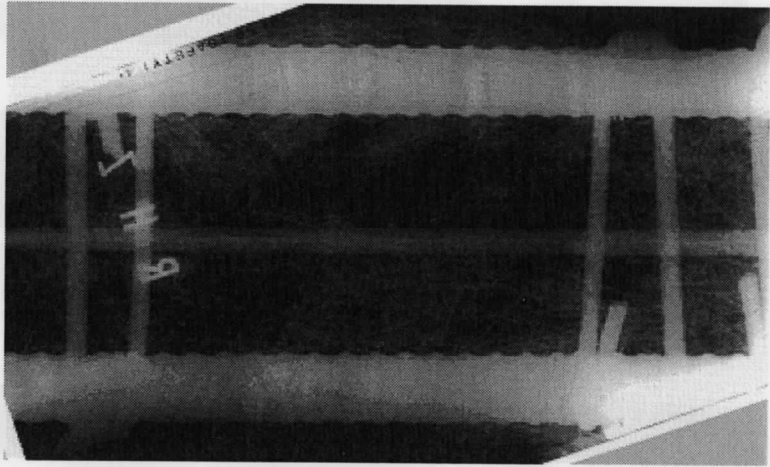


(4) 最大荷重の約 100%

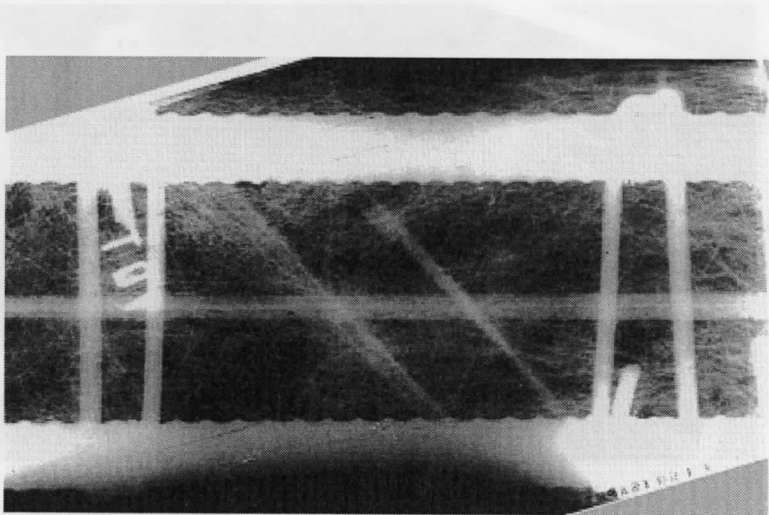
図 8.3.2 (PA-1.5-2)

表 8.3.2 (PA-1.5-2)

撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	47	71	0.12
3	90	136	1.00
4	100	152	2.10



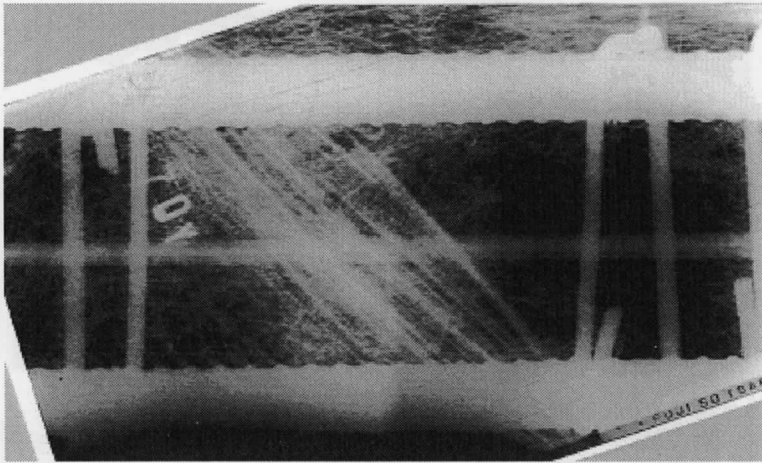
(1) 最大荷重の 0%



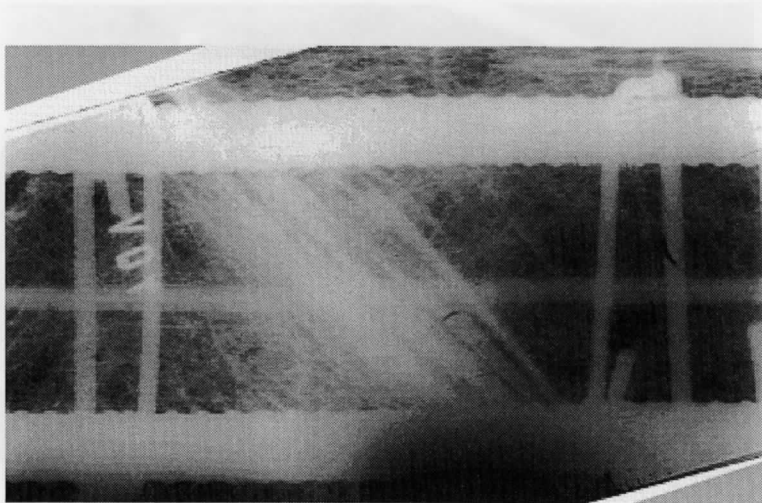
(2) 最大荷重の約 43%

図 8.3.3 X線写真 (HA-1.5-1)

(mm)位置	(mm)位置	(mm)位置	(mm)位置
00.0	00.0	00.0	00.0
01.0	01.0	01.0	01.0
02.0	02.0	02.0	02.0
03.0	03.0	03.0	03.0



(3) 最大荷重の約 94%

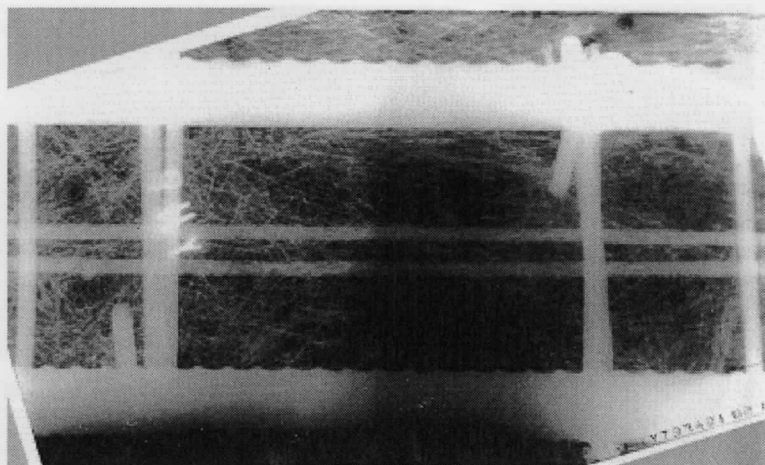


(4) 最大荷重の約 96%

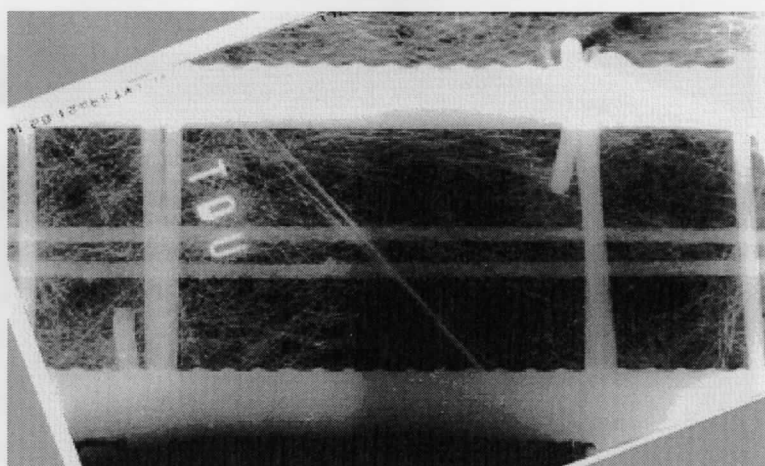
図 8.3.3 (HA-1.5-1)

表 8.3.3 (HA-1.5-1)

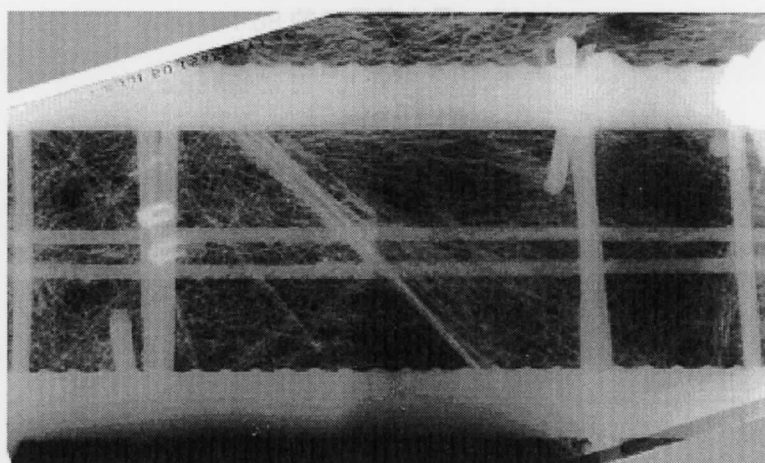
撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	43	90	0.20
3	94	196	1.00
4	96	200	2.50



(1) 最大荷重の 0%

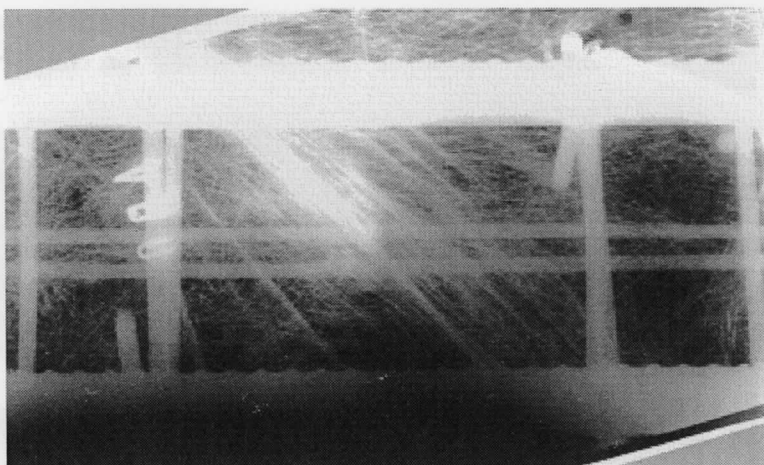


(2) 最大荷重の約 44%

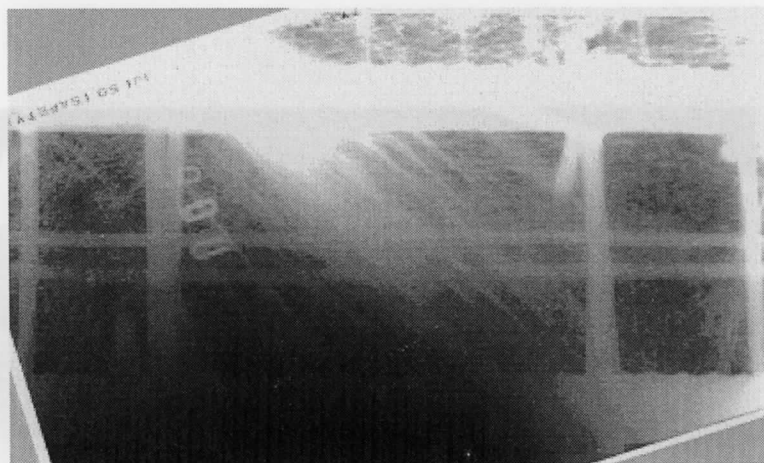


(3) 最大荷重の約 74%

図 8.3.4 X線写真 (HA-1.5-2)



(4) 最大荷重の約 98%

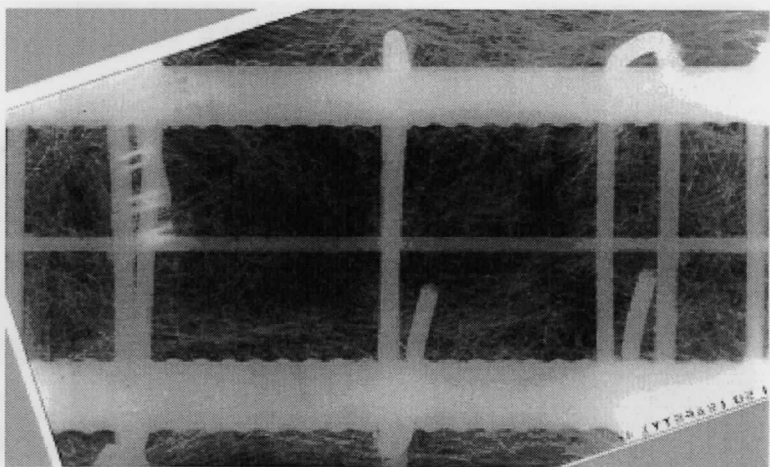


(5) 最大荷重の約 82%

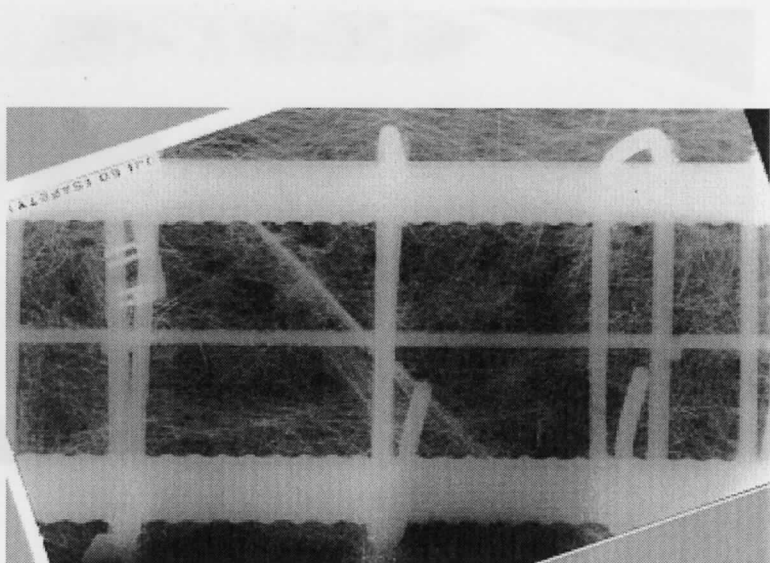
図 8.3.4 (HA-1.5-2)

表 8.3.4 (HA-1.5-2)

撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	44	80	0.45
3	74	136	1.00
4	98	180	2.00
5	82	150	3.00



(1) 最大荷重の 0%

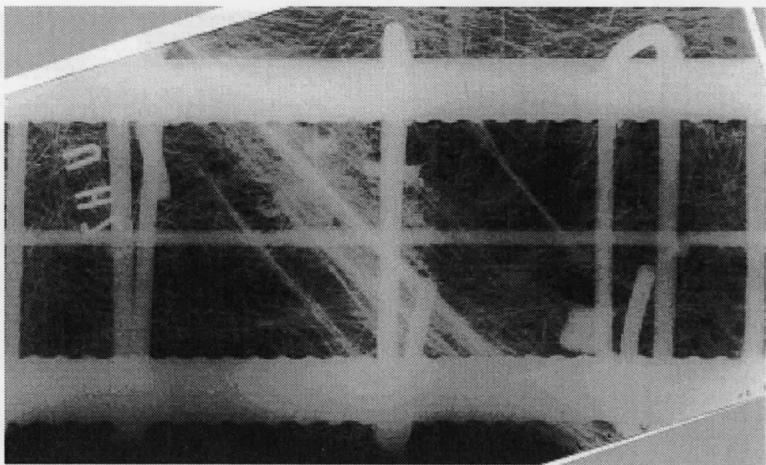


(2) 最大荷重の約 38%

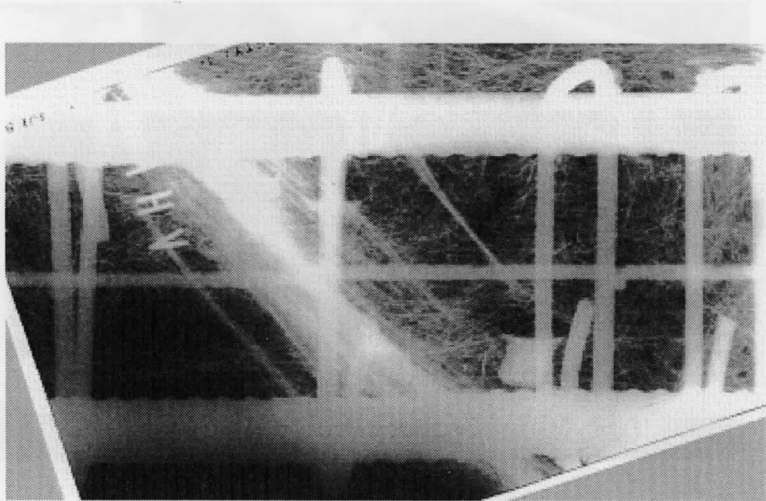
図 8.3.5 X線写真 (HB-1.5-1)

荷重 (mm)	荷重 (mm)	荷重 (mm)	荷重 (mm)
0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.5	0.5	0.5
1.0	1.0	1.0	1.0
5.0	5.0	5.0	5.0
2.0	2.0	2.0	2.0





(3) 最大荷重の約 96%

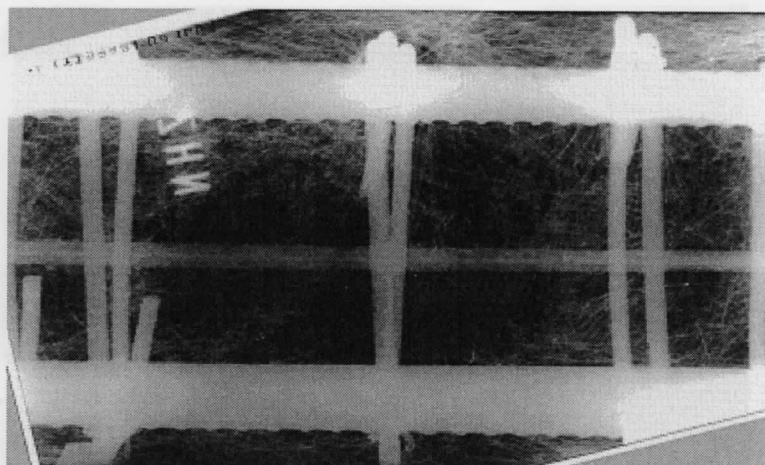


(4) 最大荷重の約 93%

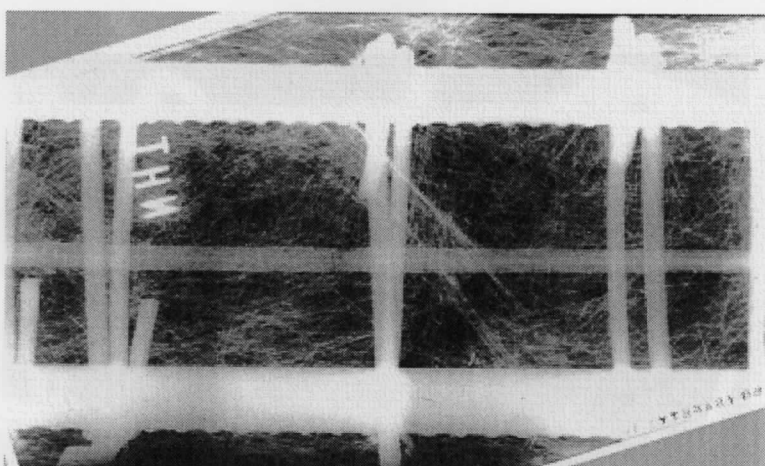
図 8.3.5 (HB-1.5-1)

表 8.3.5 (HB-1.5-1)

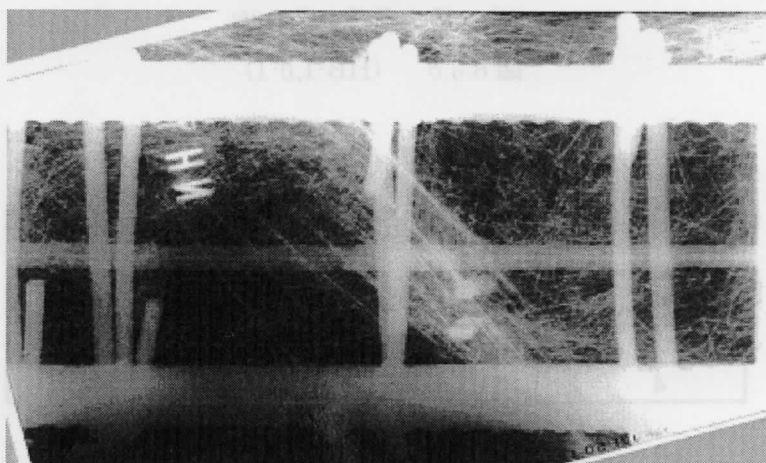
撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	38	70	0.10
3	96	176	1.10
4	93	170	2.10



(1) 最大荷重の 0%

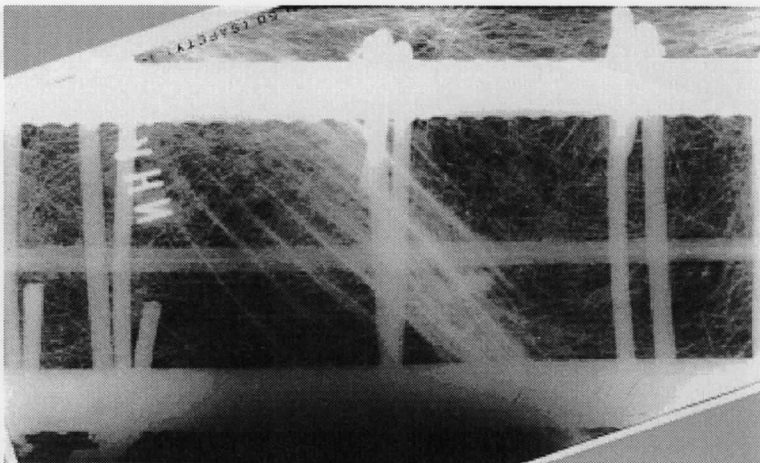


(2) 最大荷重の約 40%

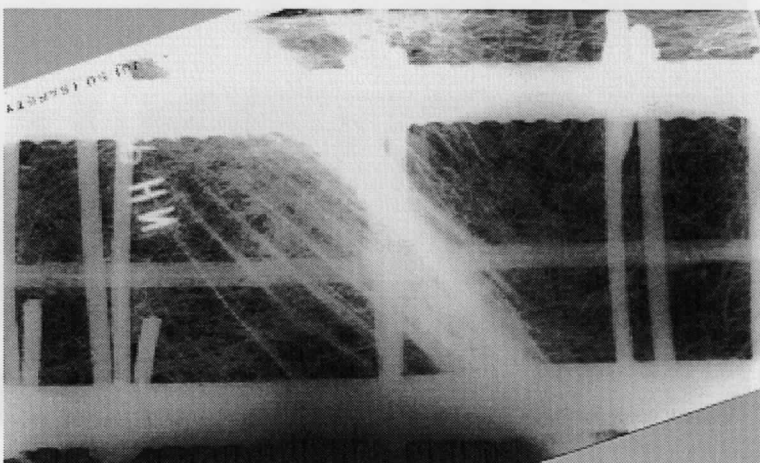


(3) 最大荷重の約 74%

図 8.3.6 X線写真 (HB-1.5-2)



(4) 最大荷重の約 94%

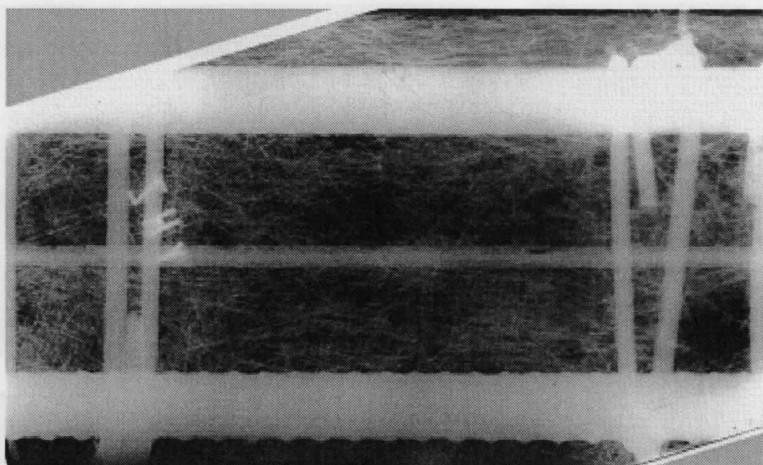


(5) 最大荷重の約 70%

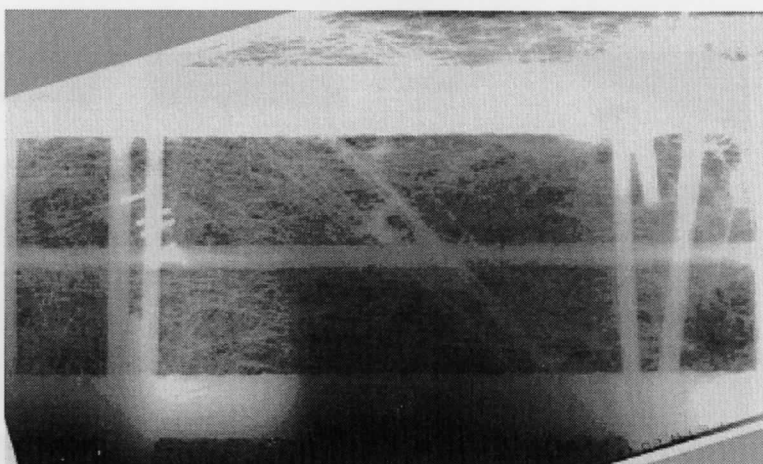
図 8.3.6 (HB-1.5-2)

表 8.3.6 (HB-1.5-2)

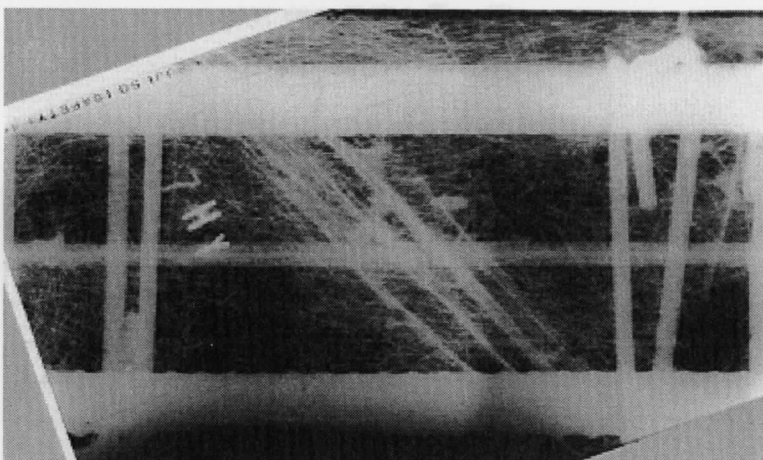
撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	40	80	0.20
3	74	148	1.00
4	94	189	2.00
5	70	140	3.00



(1) 最大荷重の 0%

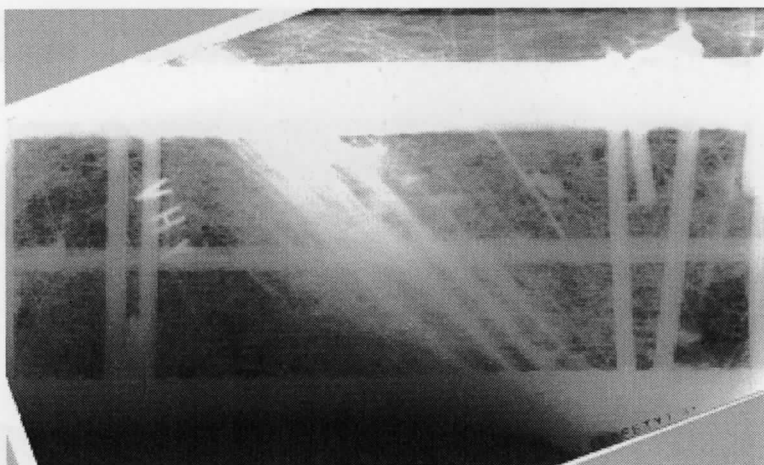


(2) 最大荷重の約 50%

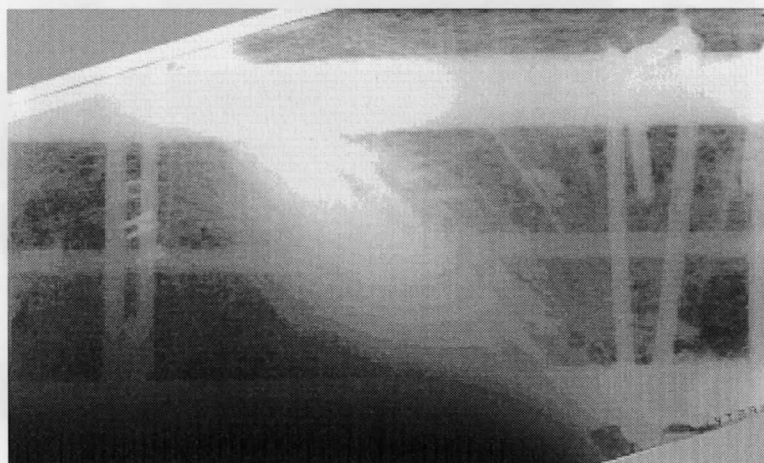


(3) 最大荷重の約 75%

図 8.3.7 X線写真 (HA-2.0-1)



(4) 最大荷重の約 100%



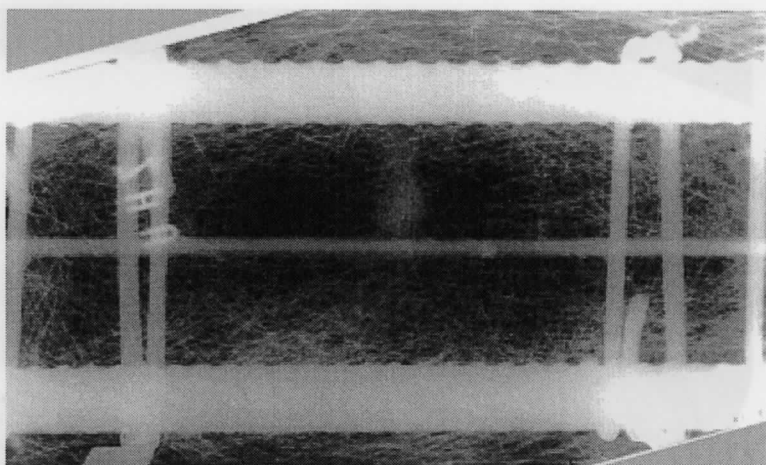
(5) 最大荷重の約 79%

図 8.3.7 (HA-2.0-1)

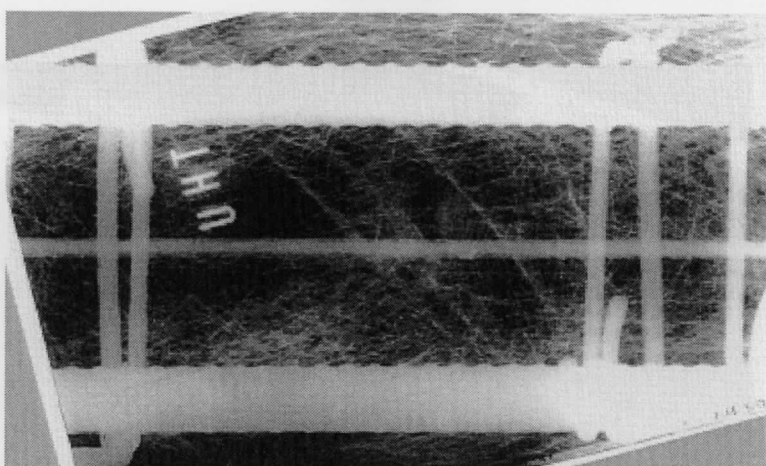
表 8.3.7 (HA-2.0-1)

撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	50	90	0.69
3	75	136	1.60
4	100	180	2.50
5	79	143	3.90

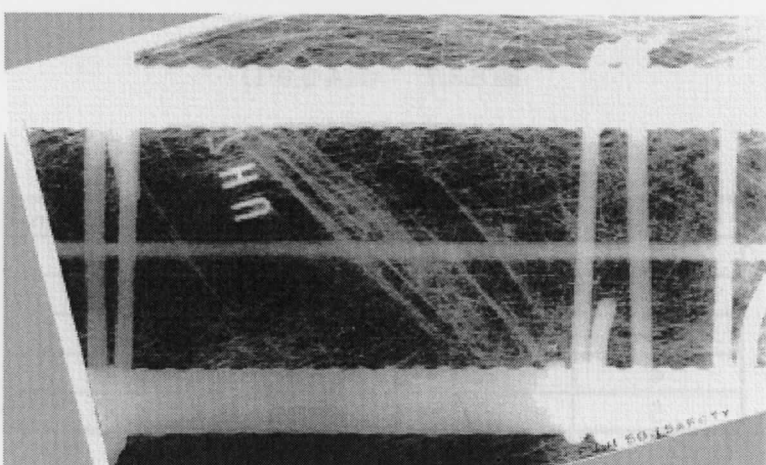




(1) 最大荷重の 0%

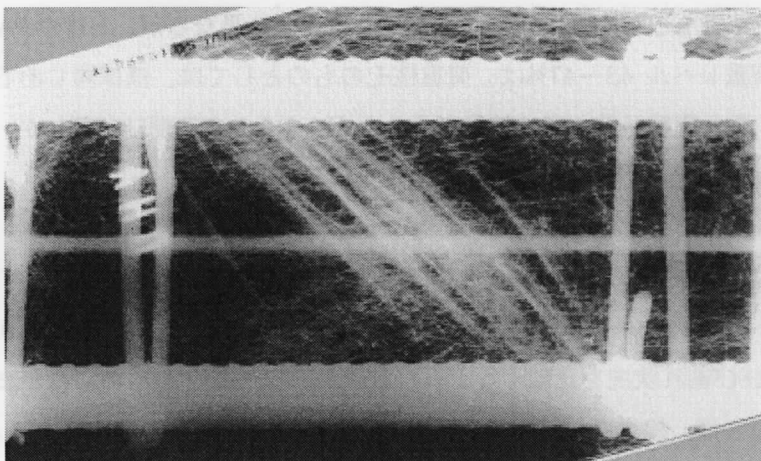


(2) 最大荷重の約 38%

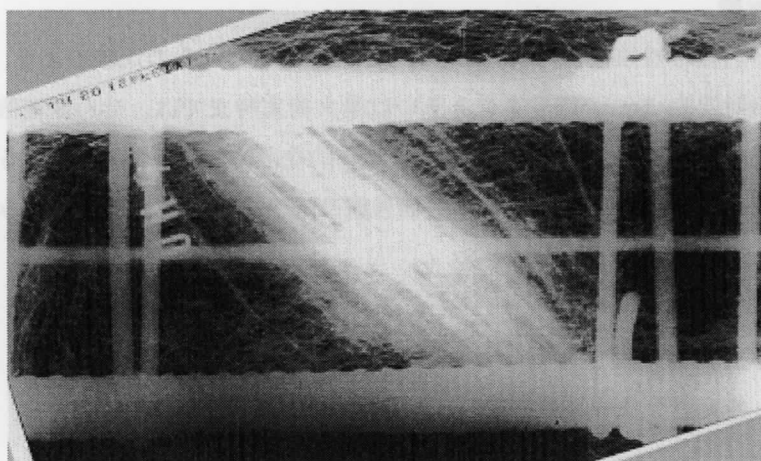


(3) 最大荷重の約 68%

図 8.3.8 X 線写真 (HA-2.0-2)



(4) 最大荷重の約 89%



(5) 最大荷重の約 99%

図 8.3.8 (HA-2.0-2)

表 8.3.8 (HA-2.0-2)

撮影箇所	P/Pmax(%)	荷重(kN)	相対変位(mm)
1	0	0	0.00
2	38	80	0.15
3	68	141	1.00
4	89	185	2.00
5	99	206	3.00

但し、最大荷重値が各々異なるために荷重レベルとしては大きく異なるが、上述の PA-1.5 の荷重レベル 60% とこれら HA-1.5 の荷重レベル 43～47%は、荷重値そのものとしては、ほぼ同じあるいは比較的近い程度の荷重値である。また、最大荷重が最も高い結果を示した HA-1.5-1 の初期ひび割れが、長方形のせん断パネル領域の対角位置 2 ヶ所の隅角部から 2 本平行に生じている特徴がある。

## (2) せん断ひび割れに及ぼすスチールコード混入量の影響

同一量 (1.0vol.%) のポリエチレン繊維を混入の上で、スチールコード混入率を 0.5vol.%だけ変化させた HA-1.5 と HA-2.0 のひび割れ状況を比較すると、ひび割れパターンそのものにはあまり顕著な差違は認められない。強いて言うならば、相対変位 2mm の段階で両者のひび割れ状況を比較すると、HA-2.0 の方がより少ない微細な分布ひび割れの局所的な拡大傾向を示している。

## (3) せん断補強筋の影響

同一のハイブリット型繊維補強複合材料を用いた HA-1.5 と HB-1.5 の比較により、せん断補強筋の影響について考察すると、相対変位 1mm 程度まであるいは最大荷重時までは、せん断補強筋が明らかにせん断ひび割れ幅の拡大を抑えていることが分かる。しかし、最終的な段階ではむしろ HB-1.5 の方がひずみ領域の局所化を顕著に引き起こしている。これは、せん断補強筋の降伏によって一気にひずみが降伏位置に集中したためと考えられる。

# 8.4 荷重変位関係の実験結果及び考察

図 8.4.1～8.4.8 に、各実験シリーズの荷重—相対変位曲線を示す。

## (1) せん断強度—変形特性に及ぼすスチールコード混入の影響

ポリエチレン繊維のみを混入した PA-1.5 (図 8.4.1) とハイブリット型繊維補強を施した HA-1.5 (図 8.4.3 及び 8.4.4) を比較すると、スチールコード混入により明らかに剛性の上昇とせん断強度の増大が認められる。それに伴い、最大荷重までに吸収されるエネルギーは、スチールコードを混入したハイブリット型複合材料の方が高い。

## (2) せん断強度—変形特性に及ぼすスチールコードの混入量の影響

せん断強度に及ぼすスチールコード混入率の影響は、ばらつきの範囲が大きいために明確には認められない。原因は明確ではないが、HA-1.5-1 と HA-1.5-2 は初期剛性が異なり、最大荷重時の相対変位量も約 1.5 倍異なっている。それに対して、スチールコード混入率の高い HA-2.0-1 と HA-2.0-2 は、最大荷重が約 14%異なるものの荷重の変形挙動が安定しており、最大荷重時の相対変位量も 2.0～2.5mm と比較的近い値を示している。但し、HA-2.0-2 の最大荷重後の挙動は脆性的であり、スチールコードの混入率上昇に伴ってかぶりコンクリート部で繊維の分散が悪くなった結果脆性的な付着破壊が起こったものと考えられる。

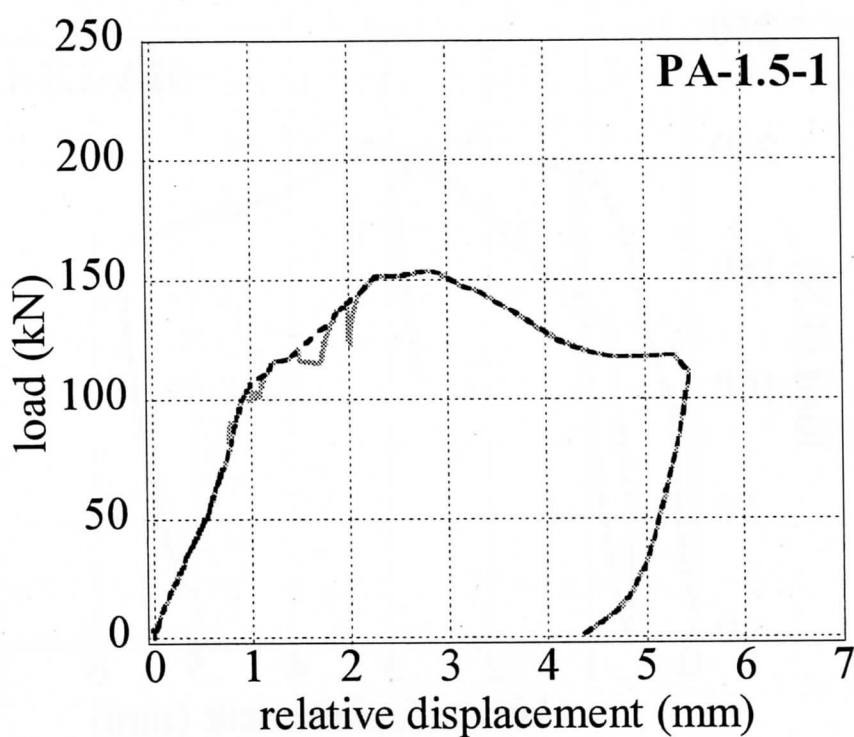


图 8.4.1 荷重—相对变位曲线 (PA-1.5-1)

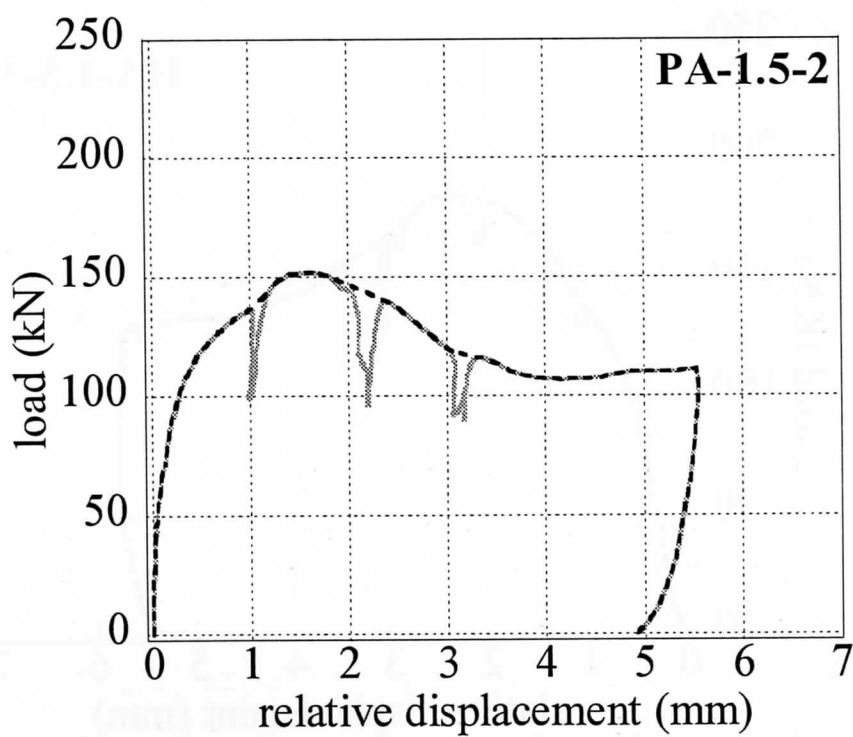


图 8.4.2 荷重—相对变位曲线 (PA-1.5-2)

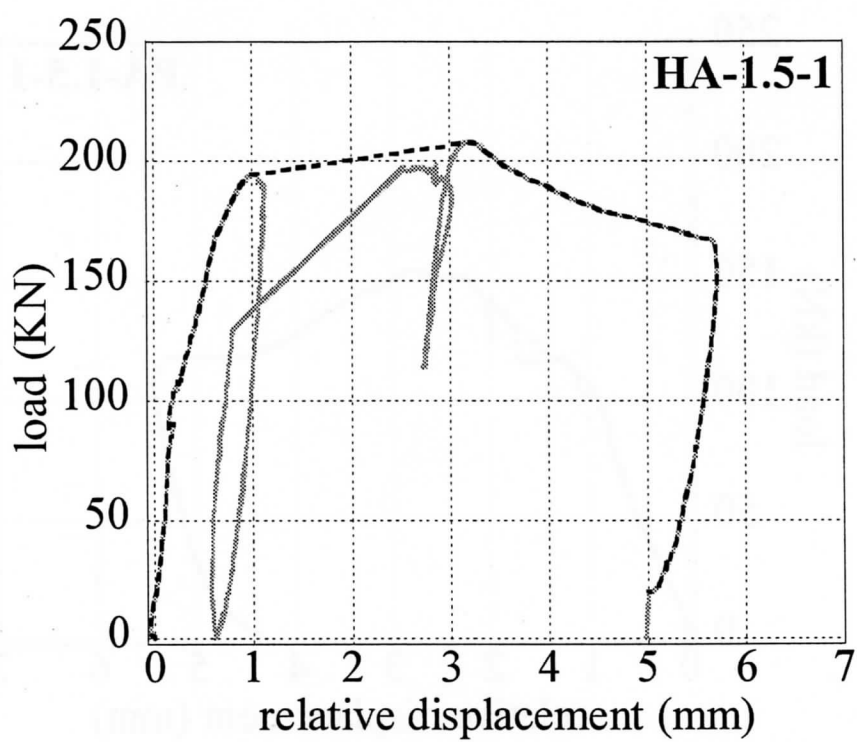


图 8.4.3 荷重—相对变位曲线 (HA-1.5-1)

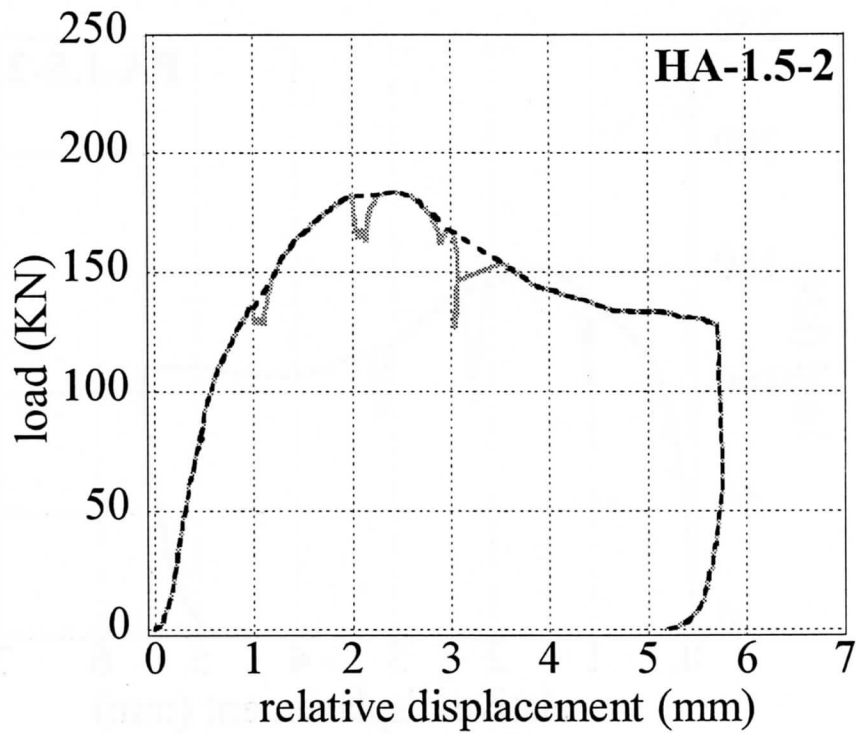


图 8.4.4 荷重—相对变位曲线 (HA-1.5-2)



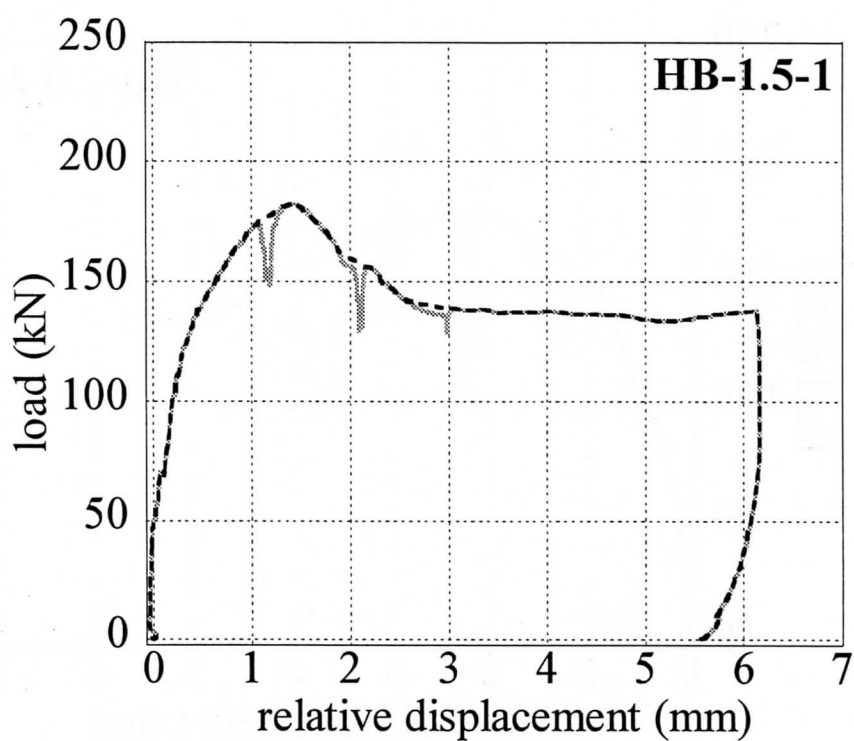


图 8.4.5 荷重—相对变位曲线 (HB-1.5-1)

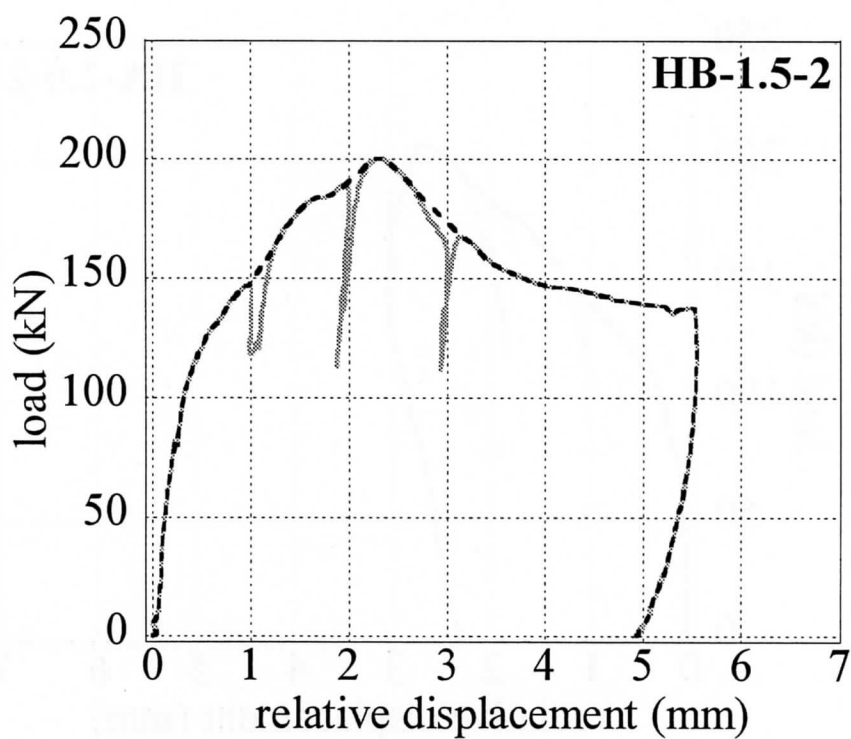


图 8.4.6 荷重—相对变位曲线 (HB-1.5-2)

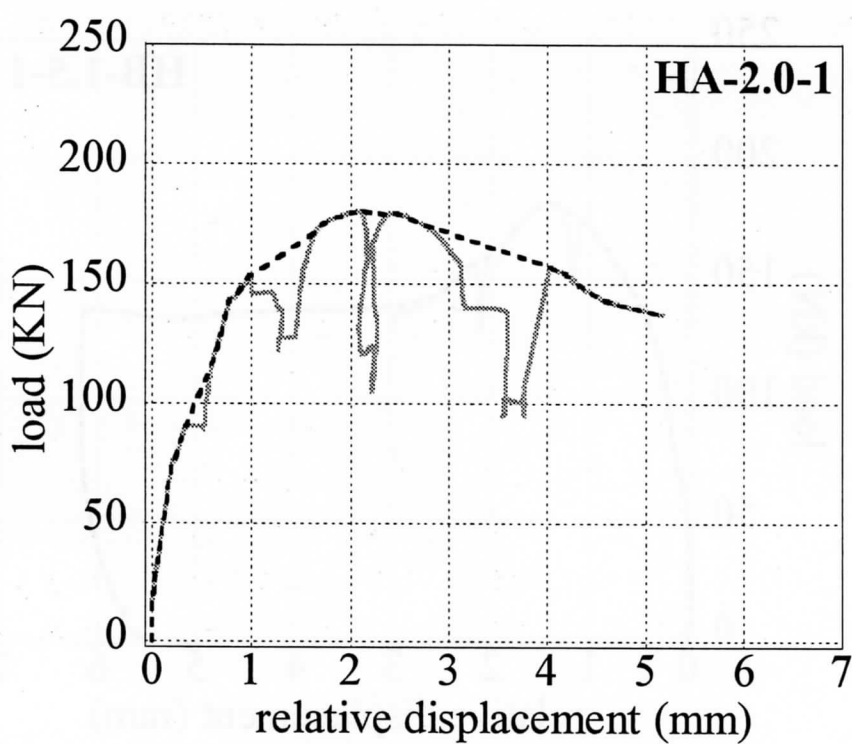


图 8.4.7 荷重—相对变位曲线 (HA-2.0-1)

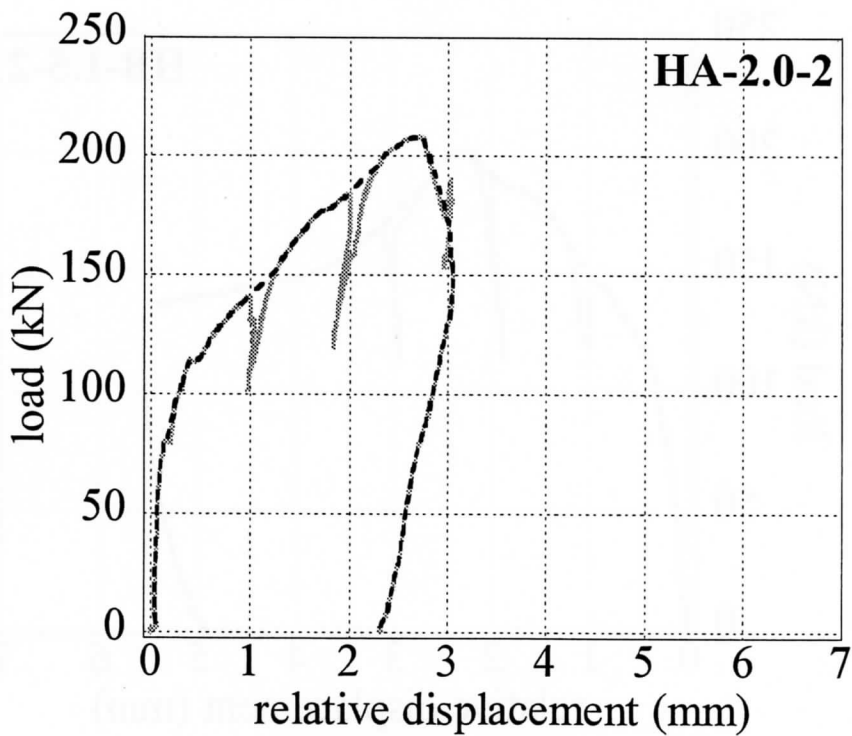


图 8.4.8 荷重—相对变位曲线 (HA-2.0-2)

### (3) せん断強度—変形特性に及ぼすせん断補強筋の影響

せん断補強筋を付加された HB-1.5 は、HA-2.0 の場合と同様に、せん断強度の増大には必ずしもつながらないものの、初期剛性及び挙動の安定性に大きく貢献している。

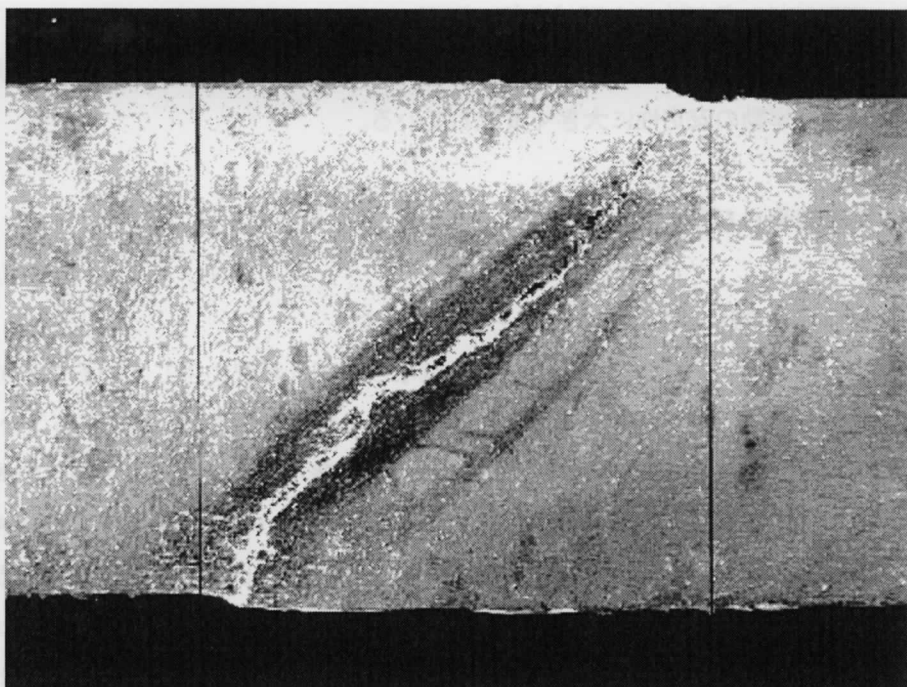
## 8.5 せん断破壊後の表面ひび割れ

せん断破壊後の表面ひび割れの写真を図 8.5.1～8.5.8 に示す。

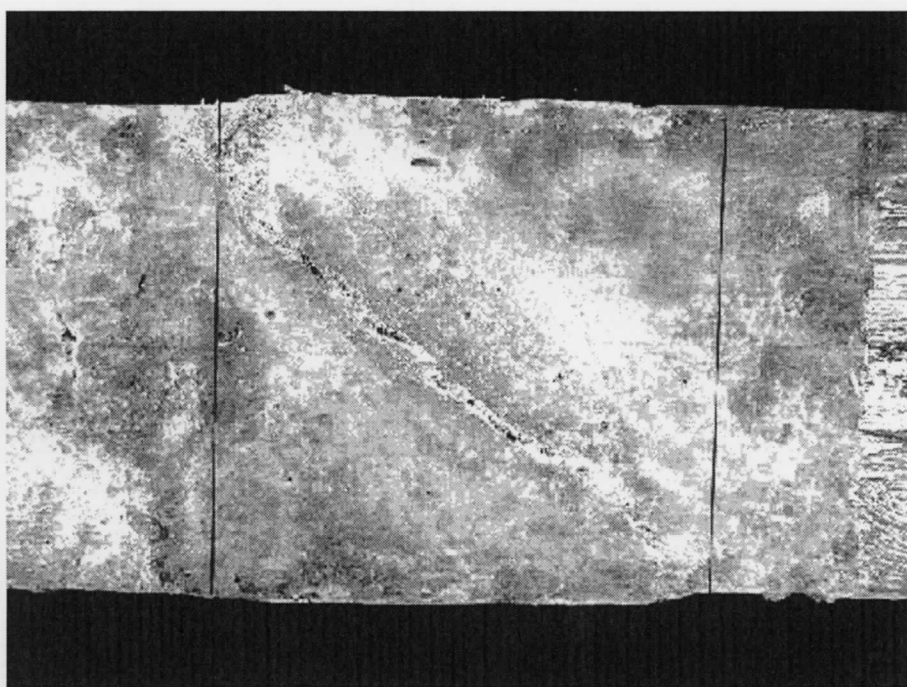
詳細に観察すると、大きな斜めひび割れの周囲に微細なひび割れが沢山生じていることが分かる。但し、最終的なひび割れ図からは、破壊過程に観察されたひび割れパターンの変化を推定することは困難である。

スチールコードを全く含まない PA-1.5 では、斜張力による顕著な斜めせん断ひび割れの局所化拡大がそのまま最終的な崩壊につながったと判断される。それに対して、スチールコードを混入した HA-1.5 及び HB-1.5 ではひび割れがある幅の中に平行に分布するひび割れを階段状に移動しながら連結している様子が観察される。このことから、最終的な崩壊は並行に並んだ分布ひび割れの間のストラッドの圧潰によって引き起こされたものと考えられる。これらのことが高い強度の増大や吸収エネルギーの増大につながったものと考えられる。

一方、スチールコードが最も多い HA-2.0 の試験体では、最終破壊後も局所的なひび割れ幅の大きな拡大は認められず、他のシリーズと大きく異なる様相を呈している点が注目される。

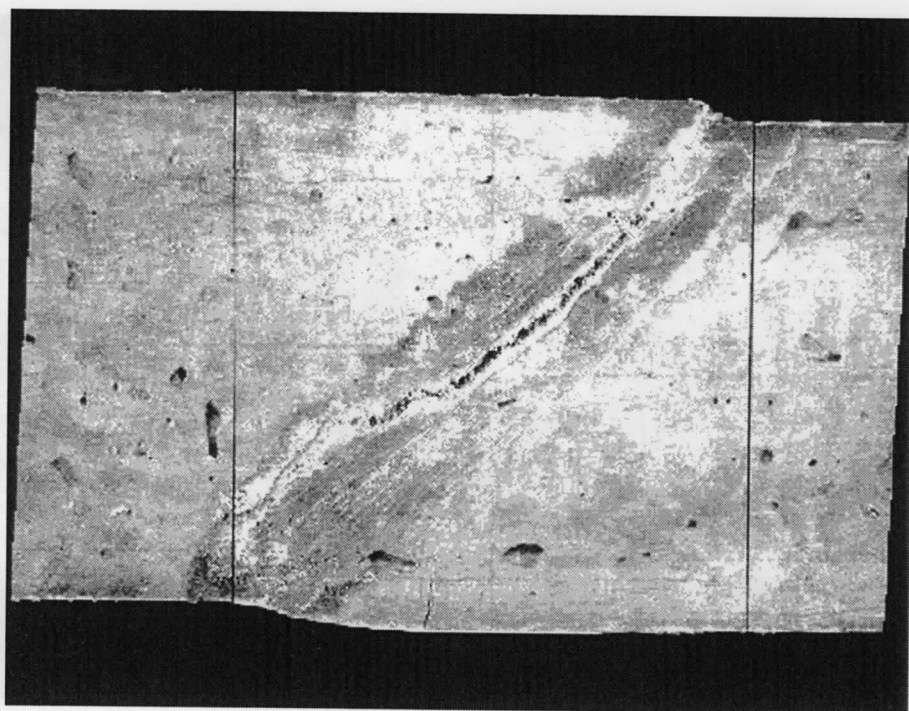


(a)

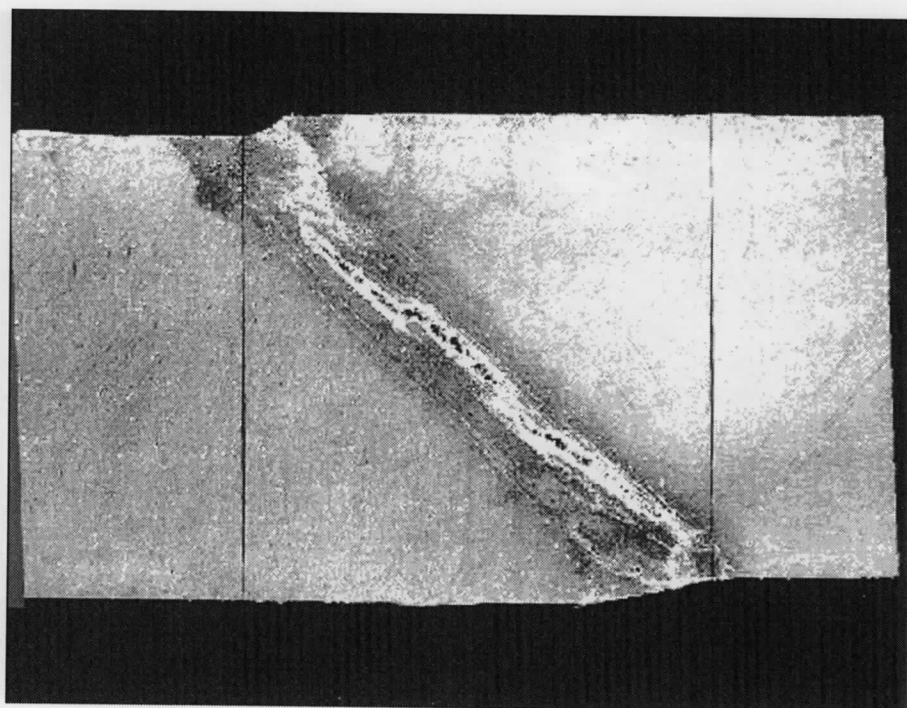


(b)

図 8.5.1 せん断破壊後の表面ひび割れ (PA-1.5-1)



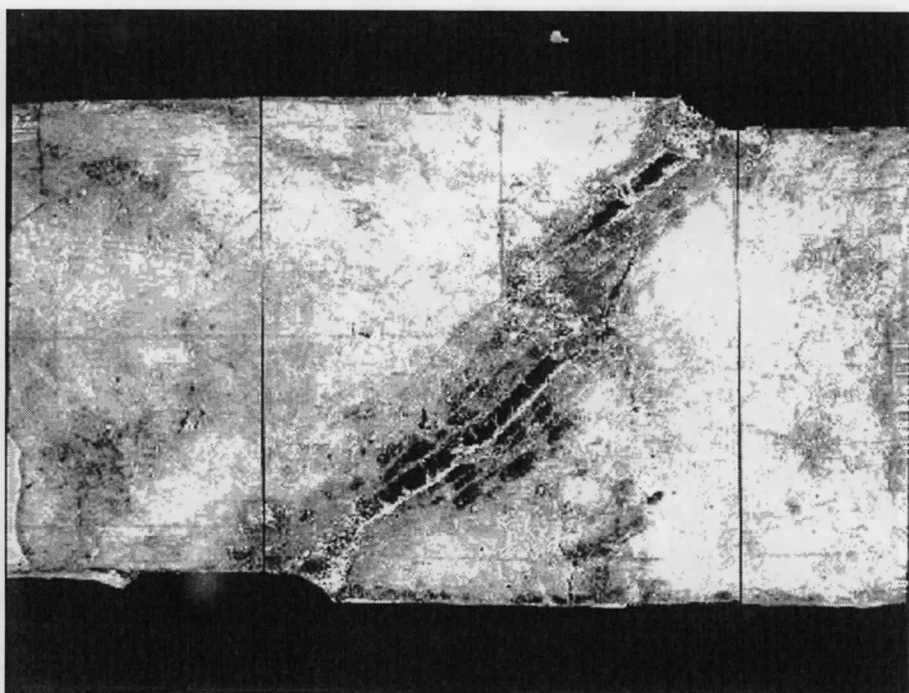
(a)



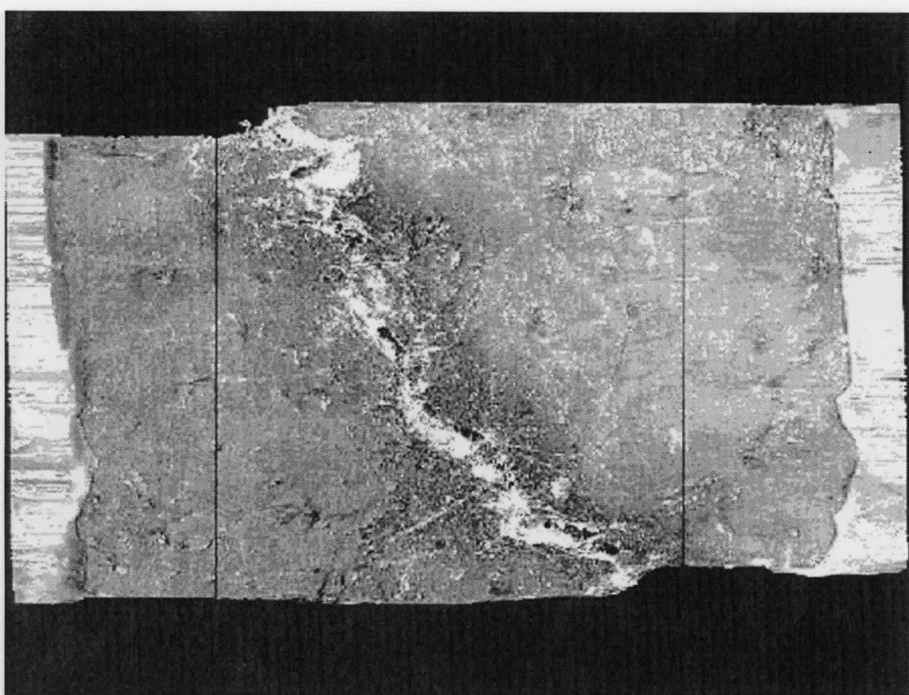
(b)

図 8.5.2 セン断破壊後の表面ひび割れ (PA-1.5-2)



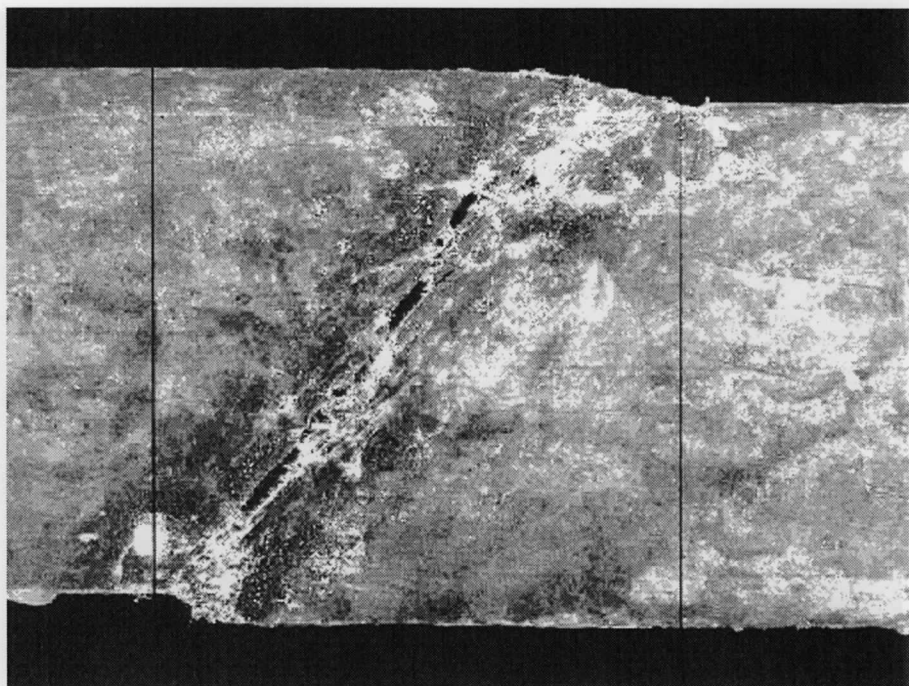


(a)

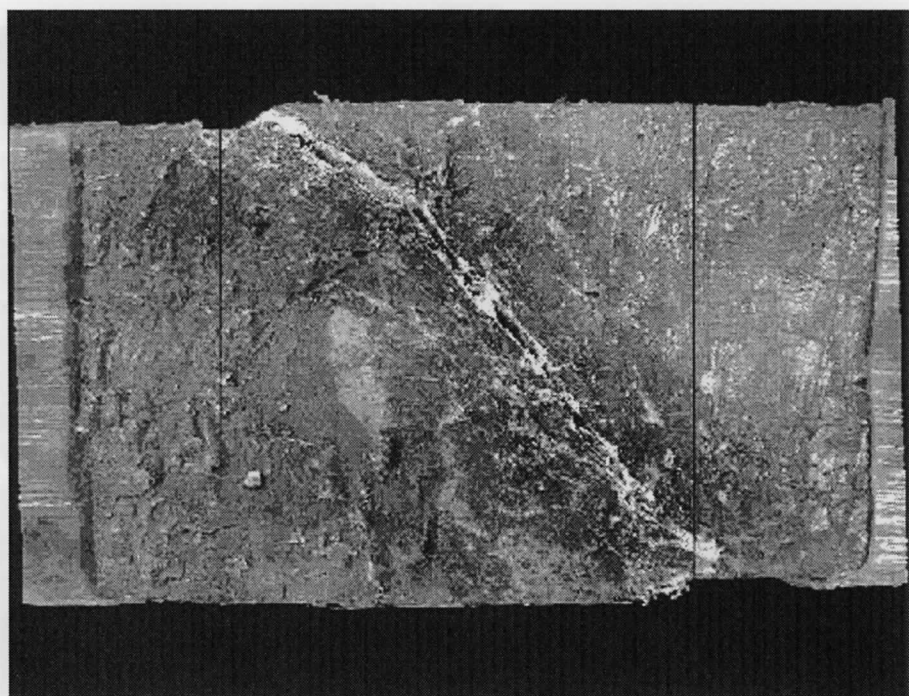


(b)

図 8.5.3 セン断破壊後の表面ひび割れ (HA-1.5-1)

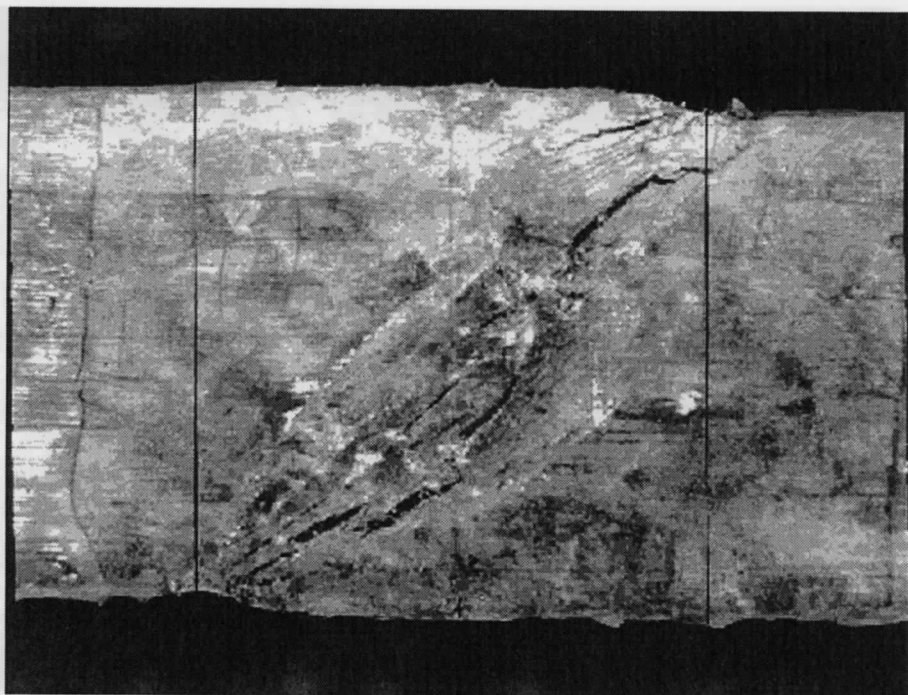


(a)

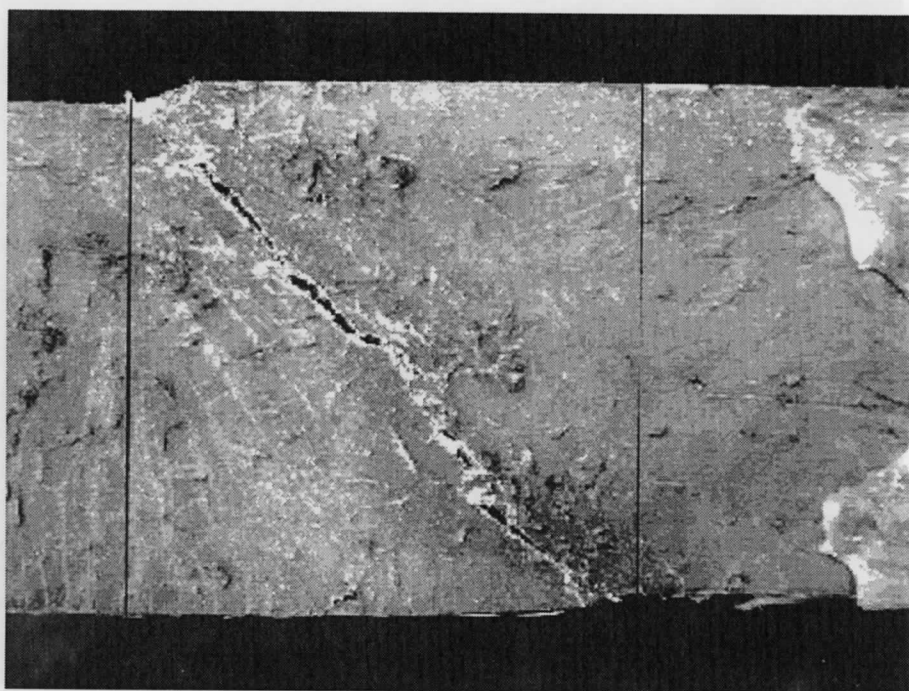


(b)

図 8.5.4 セン断破壊後の表面ひび割れ (HA-1.5-2)

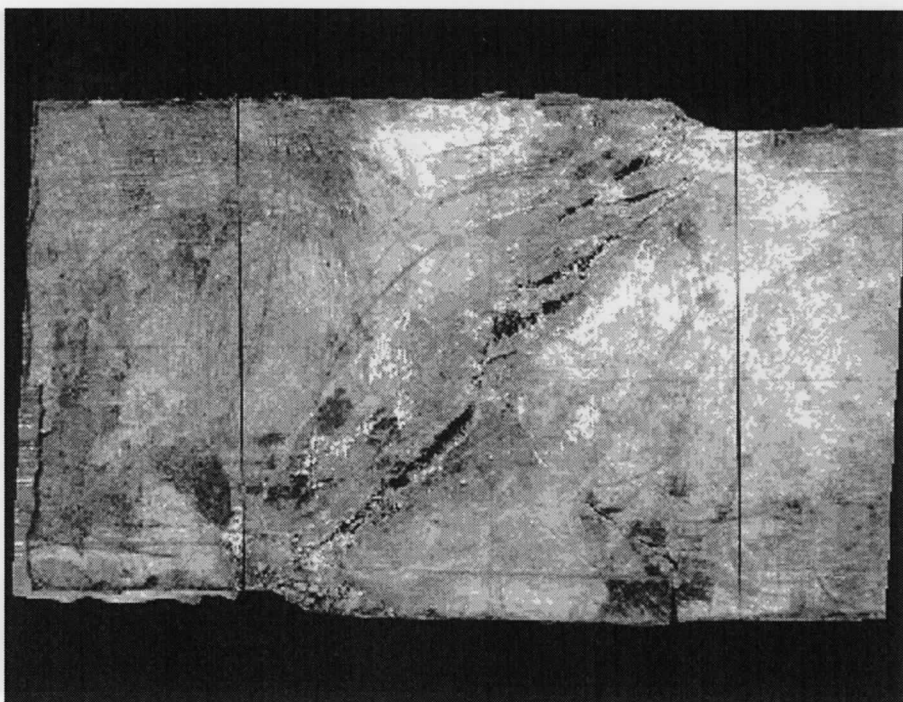


(a)

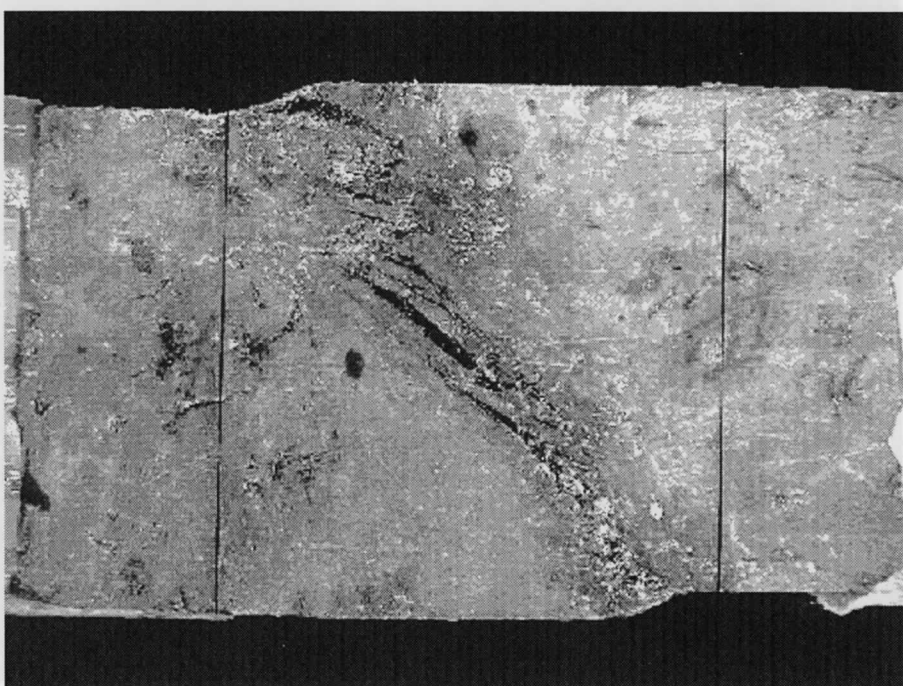


(b)

図 8.5.5 セン断破壊後の表面ひび割れ (HB-1.5-1)



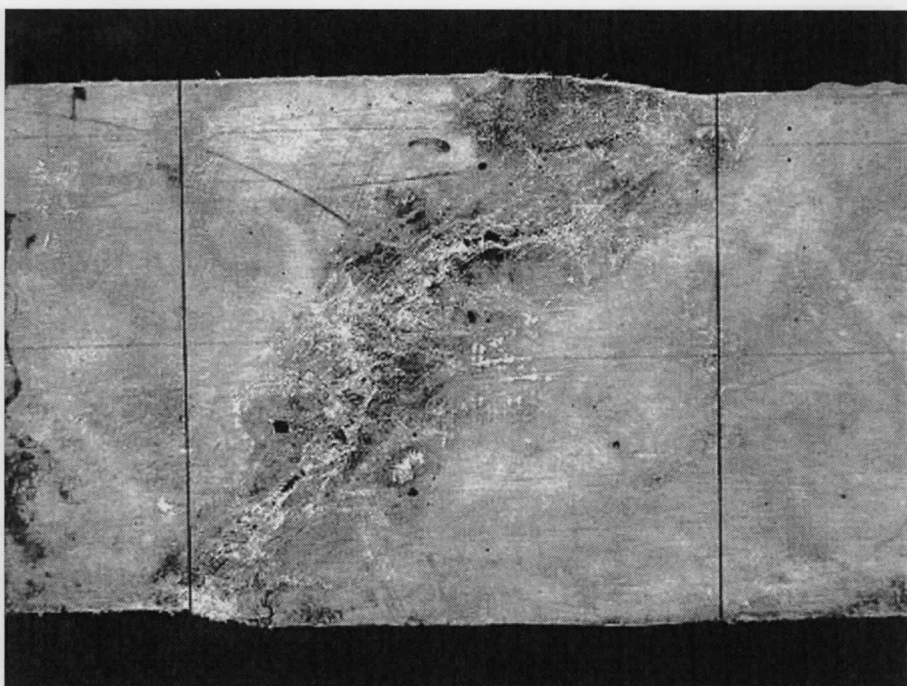
(a)



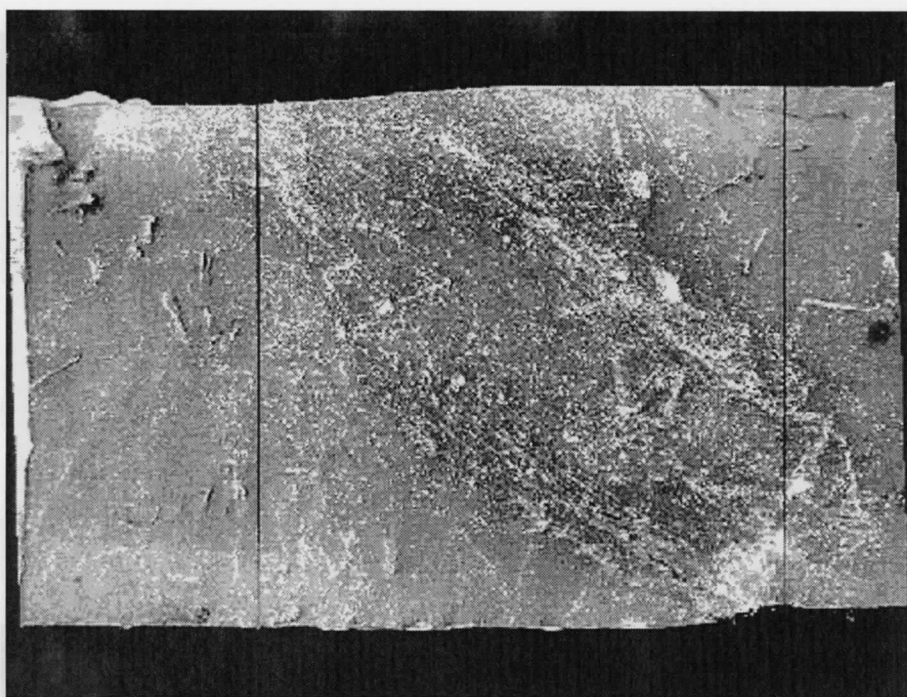
(b)

図 8.5.6 せん断破壊後の表面ひび割れ (HB-1.5-2)





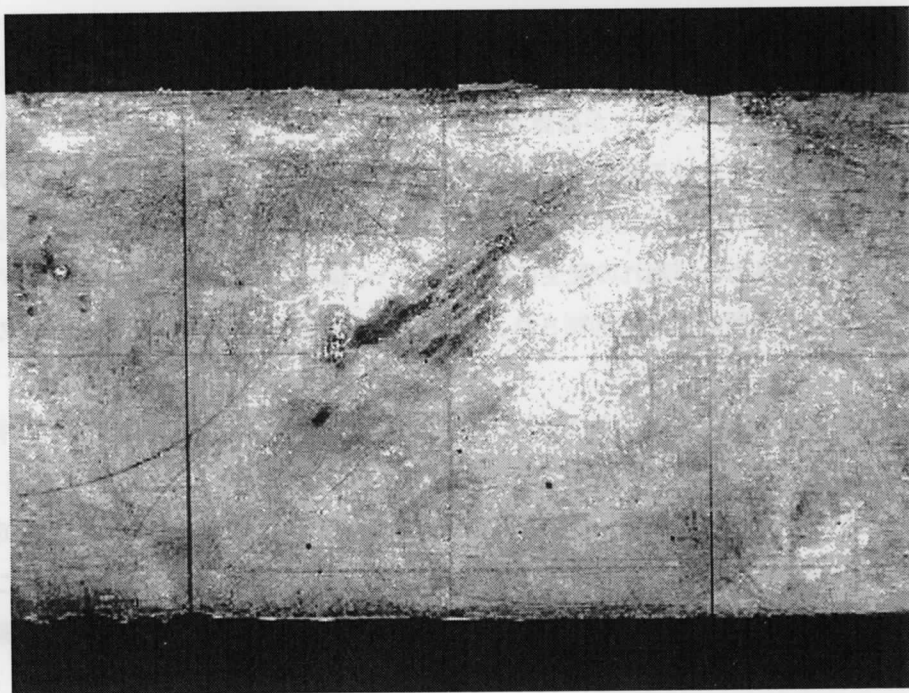
(a)



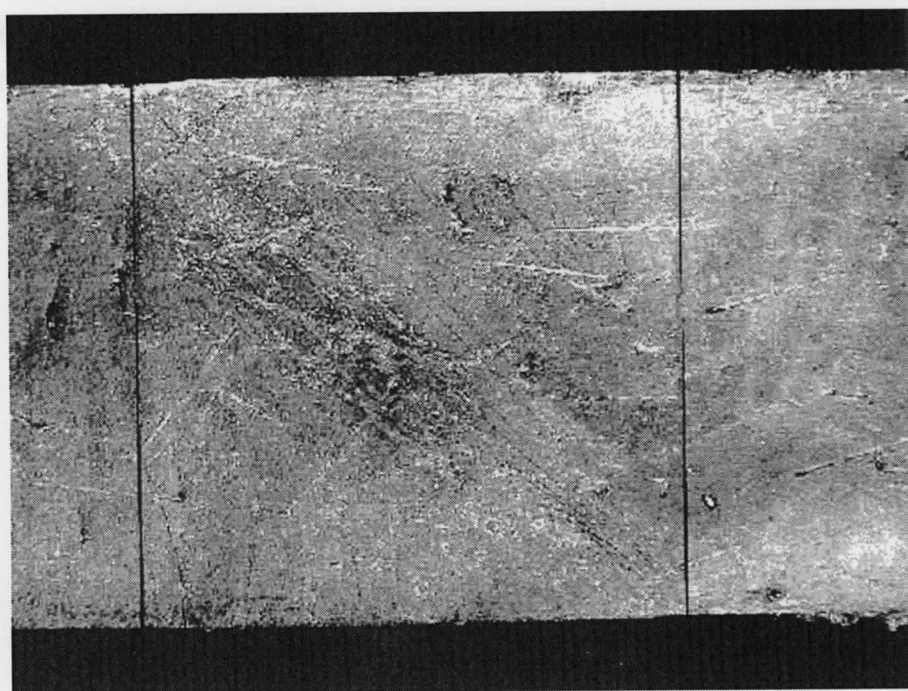
(b)

図 8.5.7 せん断破壊後の表面ひび割れ (HA-2.0-1)





(a)



(b)

図 8.5.8 せん断破壊後の表面ひび割れ (HA-2.0-2)

## 8.6 まとめ

鉄筋コンクリート造梁のせん断破壊とそのひび割れ挙動並びに変形特性に及ぼすハイブリット型補強の効果を実験的に検討した結果、以下のことが確認された。

- (1) 70~90 kN の荷重レベルにおける初期ひび割れ段階では、HFRCC で作製された全ての試験体に微細なせん断ひび割れが確認できた。それに対してポリエチレン繊維のみを混入した場合は、最初に曲げせん断ひび割れを生じ、徐々に斜めひび割れの発生に変化していく傾向が観察された。また、HFRCC を用いることによって、降伏後の局所的破壊が抑制され、脆性的なせん断破壊に対する HFRCC の有効性を確認できた。
- (2) スチールコード混入率を高くすることにより、不十分な剛性及び多くの微細ひび割れは得られるが、繊維の分散の影響によって付着破壊を引き起こし、靱性が低くなる可能性もあることが判明した。
- (3) せん断補強筋を配置することにより、非線形開始後、最大荷重までの剛性は高くなり安定すること、最大荷重はせん断補強筋の降伏荷重よりも HFRCC の効果で上昇している結果が得られることが判明した。また、最終段階では、鉄筋の降伏位置で局所的なひび割れ幅の増大が起こることが、X線透過写真によって確認された。

### [参考文献]

- 1) P. Casanova, P. Rossi and I. Schaller: Can Steel Fibers Replace Transverse Reinforcements in Reinforced Concrete Beams ?, ACI Materials Journal, Vol.94, No.5, pp.341-354, 1997

## 第9章 結び

第Ⅱ部では、短繊維補強高靱性セメント系複合材料の構造利用への展開を目的に、2種類の構造部材単位要素実験を行った。そしてそれらの荷重－変形関係並びにひび割れ進展挙動の変化に及ぼす構成材料の影響について考察し、以下のことを明らかにした。

- 1) 高靱性セメント系複合材料に埋め込まれた鉄筋に引張荷重を加えた結果、所謂「テンションステイフニング効果」が顕著に観察された。この抵抗力増大効果は鉄筋の降伏前のみならず、その降伏点及び降伏以降においても保持されており、しかもその効果は応力にして20%以上、ハイブリッド型複合材料のより高靱性タイプの場合は約50%もの増強を可能にするものであることが示された。
- 2) X線透過撮影により、鉄筋表面からの支圧力によって付着ひび割れが発生すること、このひび割れは、普通コンクリートの場合とは異なり、局所的なひび割れの拡大にはつながらず、細かいひび割れ幅のまま保持されてむしろ次々と数を増大し、試験体全体に分散ひび割れを引起す傾向を示すことが確認された。このことが、鉄筋降伏後も抵抗力増大効果を示す結果につながっているものと考えられる。この分散ひび割れの幅はほぼ均等に分布しているが、それは繊維の架橋によって引張力が伝達されるためであると考えられる。この均一なひび割れの分布を引起す応力の伝達に関しては、弾性係数の高い、剛な複合材料のほうがより有利であると考えられ、高靱性FRCCよりもハイブリッド型FRCCの方がより高い抵抗力を示す結果となってそれが現われたものと考えられる。
- 3) せん断補強筋のない鉄筋コンクリート梁の曲げせん断試験においては、高靱性FRCCの場合も初期ひび割れ段階において斜め引張応力による微細なひび割れが分布すること、ハイブリッド型FRCCを用いることによって剛性も高くより大きな抵抗力を示すこと、降伏後の局所的な破壊が遅延され、脆性的なせん断破壊対策にも新しい材料の有効性が確認された。

## 第III部

# ハイブリッド型セメント系複合材料を用いた 新しい構造システムの開発に関する検討

---

## 第 10 章 序

地震国であるわが国日本では、地震に対する建造物の構造形式として耐震構造が主に用いられてきた。耐震構造とは、構造骨組の剛性を高めることで、地震が起きた際の変形を低減させるという構造形式であり、人命が保護されれば構造骨組の損傷を許容するという考え方に基づいている。しかし、1995 年 1 月 17 日に起きた阪神淡路大震災でこのような建物が大きく損傷し、また崩壊に至り大きな人的被害を引き起こす結果となり、この事件をきっかけに、応答制御構造が注目され様々な研究が行われるようになる。応答制御構造とは、「構造物に動的な外乱が作用した際に、構造物に生ずる応答を何らかの機構により意図的に低減する構造形式」と定義され、大きく免震構造、エネルギー吸収機構、付加質量機構などに分類される。耐震構造が剛であるのに対し、制振構造は柔な構造であるということが出来るだろう。制振構造は耐震構造に対し、構造骨組の損傷の低減と床加速度や層間変形など応答低減を同時に低減させることができ、建物の挙動を動的応答解析により定量的に把握することが行われる制振構造は、このような目標性能を達成する最適な構造形式として積極的に採用されるようになる。

免震構造、また制振構造共に、近年多くの実施例を数えるに至り、新建築への適応にとどまらず、歴史的建築物のレトロフィットや既存建築物の耐震補強の有効な手段として応答制御構造が適用されはじめた。さらに 2000 年 6 月に施行された改正建築基準法では、応答制御構造が構造形式の一つとして取り込まれ、これまで一部の開発者、設計者によって実施されてきた応答制御構造に対して、多くの設計者が興味を持つようになり、また様々な研究が行われるようになった。

しかし、応答制御構造の一つであるエネルギー吸収機構には、一般的に、低降伏点鋼制震パネルや粘弾性ダンパー、アンボンドブレースなど弾塑性性状に優れた鋼材を用いたものが多く、鉄筋コンクリート部材によるエネルギー吸収部材の研究は今だ少ないのが現状である。また、鉄筋コンクリート建物の地震などの揺れを低減するためには、中低層の建物の場合、積層ゴムにより地震のエネルギーを絶縁する方法や架構内に粘性ダンパーや鋼材ダンパーを設け、建物の変形に応じて震動エネルギーを吸収して揺れを低減する手法がしばしば用いられる。高層建物は高強度鉄筋と高強度コンクリートにより柱と梁を堅強にすることや、耐震壁を設けるなどの方法により耐震性能を確保するのが一般的であるが、そのために柱や梁が太くなり、耐震壁を設けることで開口部の設置に制限があることがある。近年は、高強度コンクリートの開発により、鉄筋コンクリート造の住宅向け高層建物が増加しつつあり、平面計画や間取りへの影響が少ない、風揺れから大地震までを効果的に抑える制震装置が求められている。

また、鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針によれば、耐震性能確保のために構成骨組に一定の水平力を保持させ、地震時の変形を限度内に留めるとともに、靱性に富む全体曲げ降伏機構により入力するエネルギーを消費しようとする終局強度型の設計が指向されるようになった。

一方で、近年の研究により、繊維をモルタル中に混入した、繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites 以下 FRCC) が普通コンクリートに比べて脆性的な性質を改善できること、また、マトリクスに生じるひび割れを分散させることができることが確認されている。当研



究室で近年特に力を入れて研究を行ってきた、鋼繊維を撚り合わせて作製され、付着力に優れたスチールコードと呼ばれる鋼繊維と、合成繊維を同時にモルタル中に混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料 (Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites 以下 HFRCC) は FRCC の中でも特に優れた曲げ破壊性状を示し、高い靱性能を付加できることを確認した。

そこで第Ⅲ部では、HFRCC を用いた制震部材の開発を主たる大きな目的とし、更に HFRCC の効果的な利用法の提案、また HFRCC を用いたエネルギー吸収部材の構造性能を明らかにする。

## 第 11 章 エネルギー吸収部材の数値解析的検討

### 11.1 はじめに

本研究で提案し検討の対象とするエネルギー吸収部材の概要を以下に示す。

- (1) 剛強なスタブを設けることにより、変形を強制的にエネルギー吸収部材に与える。
- (2) モーメント分布に応じて断面形状を変化させることによって、ひび割れを分散させ鉄筋の塑性領域を拡大し、塑性エネルギーを最大限に利用する。
- (3) 繊維補強セメント系複合材料を用いることによりひび割れをより一層分散させる。
- (4) 帯筋を密に配置し靱性能を向上させることが挙げられる。

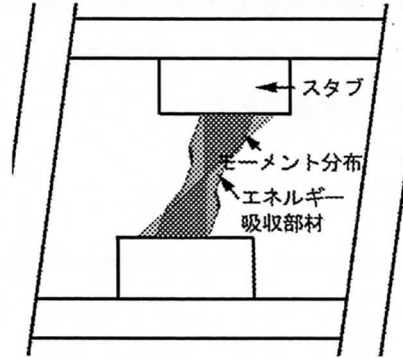


図-11.1 エネルギー吸収部材概

主とする目的は鉄筋の塑性エネルギーを最大限に利用することであり、そうすることで履歴性状に優れ、エネルギー吸収部材としての可能性が大きくなると考えられる。繊維補強セメント系複合材料は、普通コンクリートに比べ脆性的な性質を改善でき、ひび割れを分散させることが確認できている。この材料を用いることでより靱性能に優れた鉄筋コンクリート部材を開発しエネルギー吸収部材として利用すること、また繊維補強セメント系複合材料の効果的な適用例の提案をしたいと考えている。一般的には履歴減衰型のエネルギー吸収部材は弾塑性性状に優れた鋼材を用いたものが多いが、このようなエネルギー吸収部材をセメント系の材料で開発することのメリットとしては次のようなことが挙げられる。

- (1) コストの低減
- (2) 耐火性の向上
- (3) 高軸力下でのハイパフォーマンスの実現
- (4) 溶接技術による性能変化の低減、座屈（鋼材に対して）

セメント系材料で鋼材のような履歴曲線が得られるか否かが問題になる。

本章では繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材を開発する最初の段階として行った数値解析プログラム（ATENA）を用いた解析による検討について論じていく。

## 11.2 解析概要

### 11.2.1 解析モデル

解析モデルを図-11.2に示す。モデル1は文献<sup>1)</sup>の実験結果に対し解析の妥当性を検証すると共に、ここで提案するエネルギー吸収部材との比較用のモデルである。モデル2は本研究で提案する、モーメント分布を考慮し断面形状を変化させたモデル、モデル3はモデル2に対し、形状に合わせてX型配筋を配したものである。主筋にD19(SD490)、せん断補強筋にはD10(SD295)を80mm間隔で配し、これは全モデルを通して共通である。

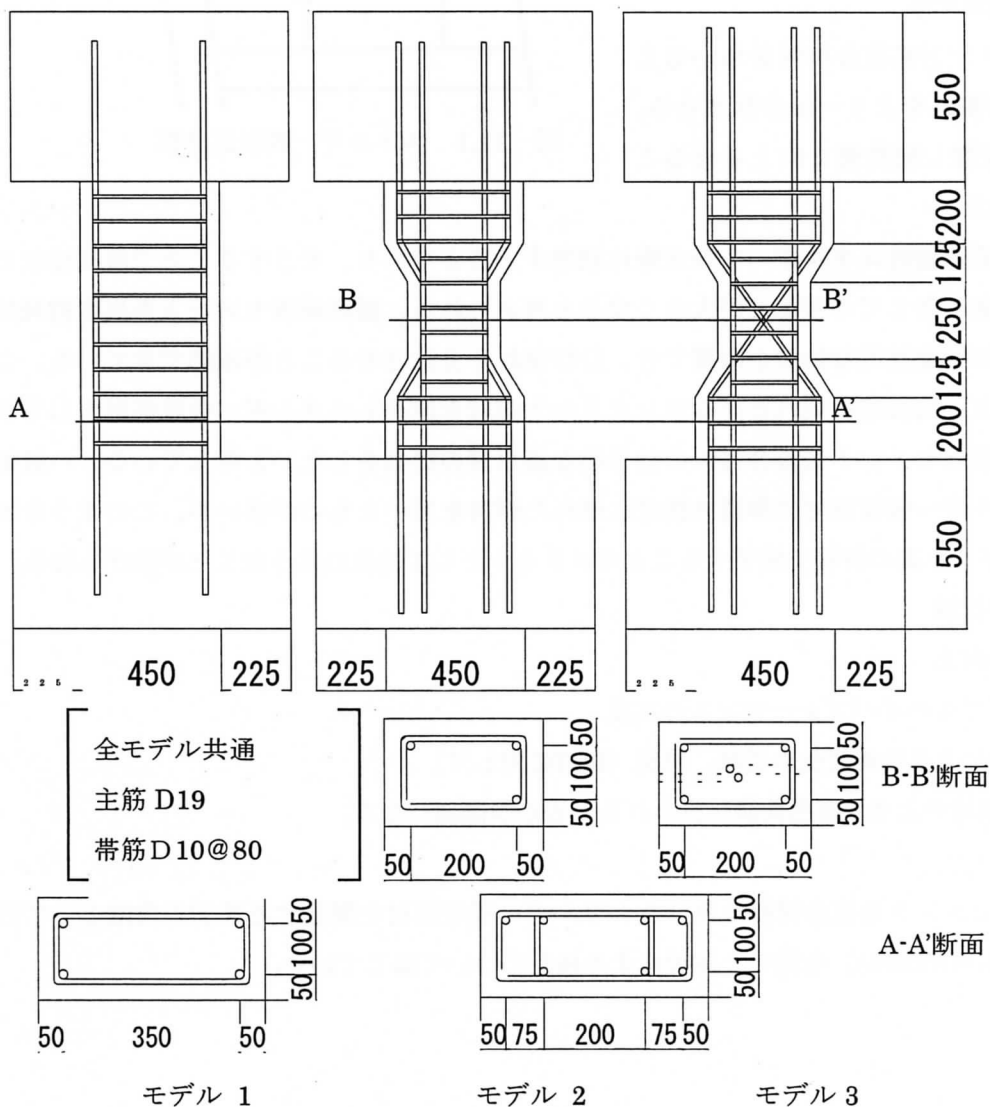


図-11.2 解析モデル

### 11.2.2 数値解析プログラム ATENA について

解析は、有限要素法汎用プログラム・ATENA<sup>2)</sup>を用いて四角形要素による平面応力解析を行った。ひび割れモデルは回転分散ひび割れモデルを採用した。2軸強度包絡線により有効強度を評価し、2軸応力状態を等価1軸応力-ひずみ関係に近似し、載荷点変位制御に対し Newton-Raphson 法により収斂解を得た。また、主筋は軸方向剛性のみを考慮した完全弾塑性モデル、帯筋は要素に分散させてその剛性を考慮した完全弾塑性モデルを適用した。

### 11.2.3 構成則

引張構成モデルはひび割れ前は線形弾性、ひび割れ後普通コンクリートにおいては式(1)の指数関数モデル<sup>3)</sup>とし、繊維補強セメント系複合材料においては破砕エネルギーに基づいた構成則を用いた。

$$\frac{\sigma_t}{f_t^{ef}} = \left[ 1 + \left( 3.0 \frac{w_t}{w_t^{cr}} \right)^3 \right] \exp \left( -6.93 \frac{w_t}{w_t^{cr}} \right) - \frac{w_t}{w_t^{cr}} (1 + 3.0^3) \exp(-6.93)$$

$$w_t^{cr} = 5.14 \frac{G_F}{f_t^{ef}} \quad (1a,b)$$

$\sigma_t$ : 引張応力度,  $f_t^{ef}$ : 2軸強度包絡線に基づく有効引張強度,  $w_t$ : ひび割れ開口変位,  $w_t^{cr}$ : 限界ひび割れ開口変位,  $G_F$ : 破壊エネルギー(0.1 N/mm)

圧縮構成モデルは式(2)に示すように、圧縮強度以前はパラボラ形状、圧縮強度以後は線形モデルとした。

[圧縮強度前パラボラモデル]

$$\frac{\sigma_c}{f_c^{ef}} = \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2, \quad \varepsilon_{c0} = \frac{2f_c'}{E_0} \quad (2a,b)$$

[圧縮強度後線形モデル]

$$\frac{\sigma_c}{f_c^{ef}} = 1.0 - \frac{w_c}{w_c^{cr}} \quad (2c)$$

$\sigma_c$ : 圧縮応力度,  $f_c^{ef}$ : 2軸強度包絡線に基づく有効圧縮強度,  $\varepsilon_c$ : 圧縮ひずみ,  $w_c$ : 圧縮強度後の圧縮変位,  $w_c^{cr}$ : 圧縮強度後の限界圧縮変位

各構成側について図示したものについて、圧縮構成側を図-11.3に、引張構成側を図-11.4に示す。

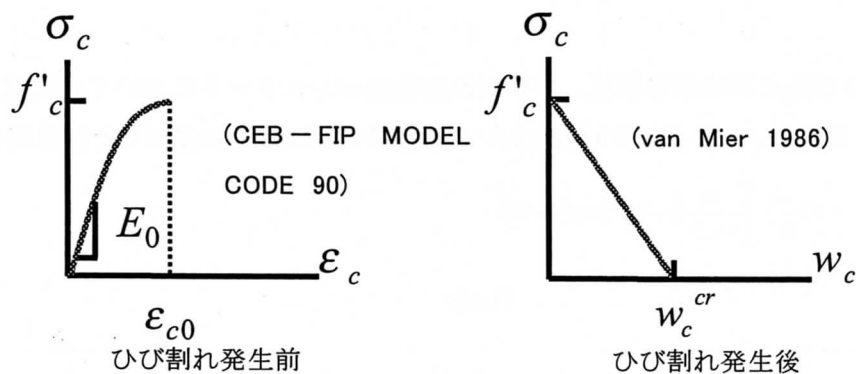


図-11.3 圧縮構成則

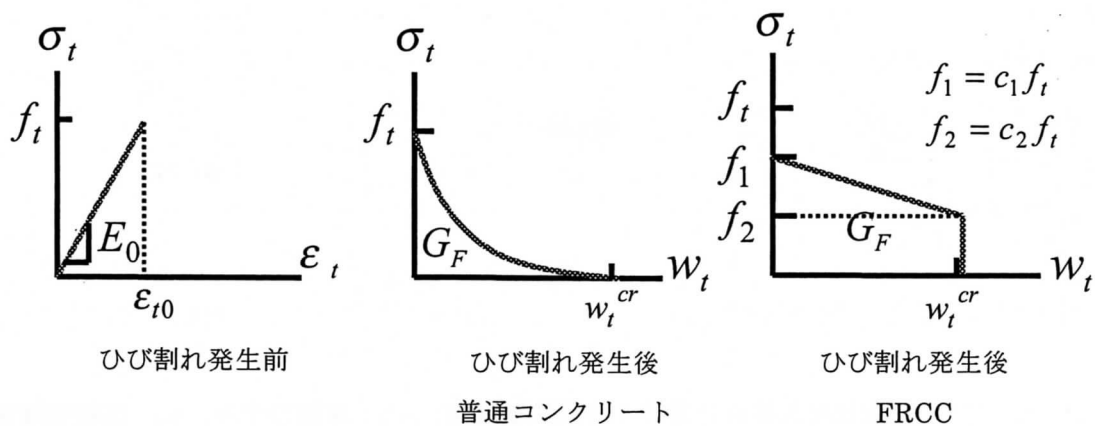


図-11.4 引張構成則



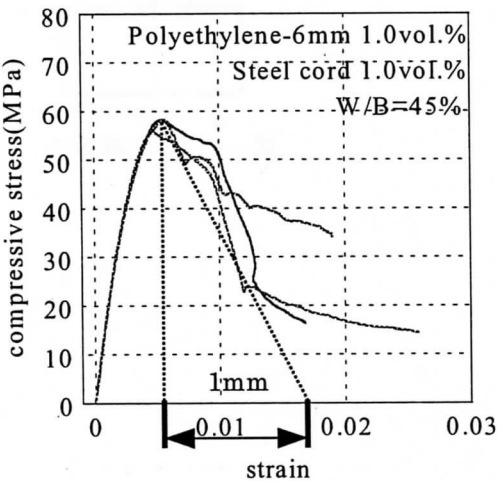
11.2.4. 材料物性

今回使用する材料の材料物性を表－11.1 に示す。HFRCC の材料特性については近年の研究によって得られた材料実験結果より、材料パラメータを算出した。円柱試験体の圧縮試験によって得られた強度－ひずみ関係を図－11.5、角柱試験体による 3 点曲げ試験により得られた荷重－CMOD 関係から、解析を行って算出した引張軟化曲線を図－11.6 に示す。このデータから、強度－ひずみ関係の最大強度点を圧縮強度とし、圧縮強度の 1/3 点と原点を結んだ線の傾きを弾性係数とした。更に、強度後応力が 0 となる変位、限界圧縮変位 ( $w_{cr}$ ) を 1mm とした。また引張軟化曲線より、その開始点を引張強度とし、ひび割れ発生後においては、一定の荷重をひび割れ幅 4.0mm まで維持できるとモデル化した。ひび割れ発生後におけるプロットの下部の面積を破壊エネルギー  $G_F$  とした。

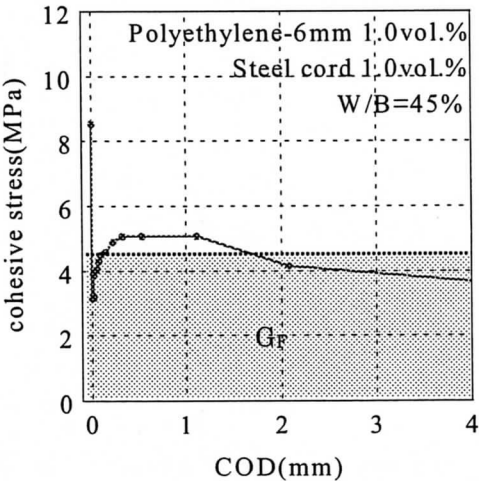
コンクリートについては文献を参考にした。なお限界圧縮変位  $w_{cr}$  については一般的なコンクリートに用いられている 0.5mm<sup>4)</sup>を採用し、 $G_F$  は 0.1N/mm とした。

SFRCC については文献<sup>5)</sup>を参考に材料パラメータを定義した。

また鉄筋の物性は表－11.2 に示す通りである。



図－11.5 圧縮 強度－ひずみ曲



図－11.6 引張軟化曲線

表－11.1 材料の物性

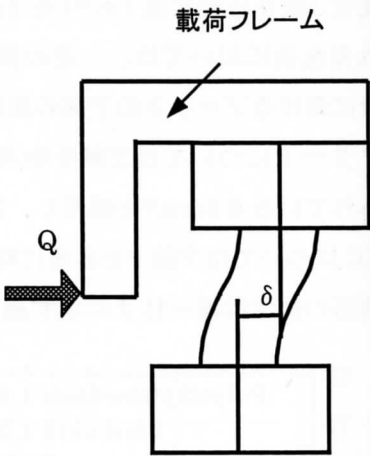
	$E_0$ (GPa)	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\epsilon_{co}$	$C_1$	$C_2$	$G_F$ (N/mm)
①普通コンクリート	25.2	34.3	2.43	0.00272	0	0	0.1
②HFRCC	21.5	57.44	8.53	0.00534	0.5104	0.5104	17.415
③SFRCC	47.6	128.7	27.2	0.00541	0.3985	0	81.3

表－11.2 鉄筋の物性

	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
D19(主筋)	591	210
D10(帯筋)	366	210

11.2.5 載荷方法

載荷方法を図－11.7 に示す。解析モデルに図のような載荷フレームを取り付け、載荷点に強制変位を与えることにより載荷を行い、載荷点反力を測定した。載荷フレームは剛体（弾性体、 $E_c=10\times10^7$ GPa）とし、載荷フレームの影響をできるだけ小さくできるようにした。



図－11.7 載荷方法

11.3 解析の妥当性の検討及びエネルギー吸収部材の力学的性能の検討

11.3.1 解析の妥当性の検討

解析での検討を行う最初の段階として、解析の妥当性について検討する。ここで使用するのは、モデル1について普通コンクリートを使用したモデルであり、このモデルは前述した通り、文献1)の内の1つの試験体を解析上で再現したモデルである。

まず始めに、圧縮限界変位  $w_c^{cr}$  について基準値とした 0.5mm で単調載荷を行った。この解析で得られた  $Q-\delta$  曲線を図-11.8 に示す。文献1)の実験結果（繰り返し載荷の包絡線）と比較してみると、最大荷重はおおむね評価できていると考えられるが、ポストピークの靱性能については実験結果に比べ早い段階から耐力が低下しているのが確認できる。

そこで、帯筋の拘束効果を考慮して帯筋に囲まれた領域のコンクリートの  $w_c^{cr}$  を変化させることにより検討を行う。

文献6)に基づいて拘束効果による靱性増加を20倍とした10.0mm、及び安全側に4倍と仮定した2.0mmについて検討する。この解析により得られた  $Q-\delta$  曲線を図-11.9 に示す。 $w_c^{cr}=2.0\text{mm}$ 、10.0mm 両方とも解析値が文献で示された繰り返し載荷の包絡線をおおむね評価していると考えられる。本解析では、解析値が過大評価とならないように  $w_c^{cr}=2.0\text{mm}$ 、つまり基準値の4倍を採用し検討する。

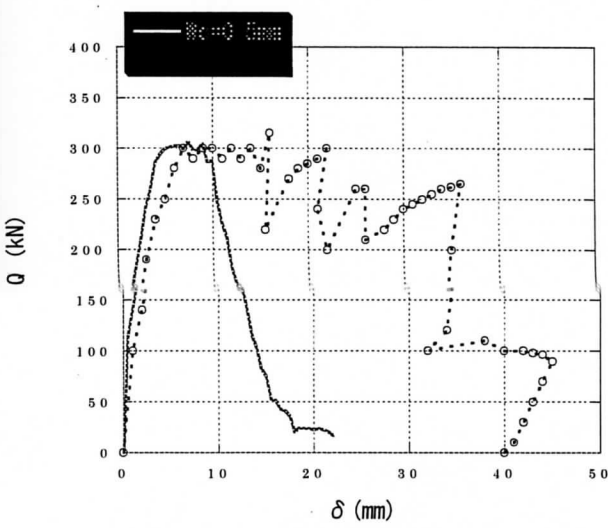


図-11.8  $w_c^{cr}=0.5\text{mm}$

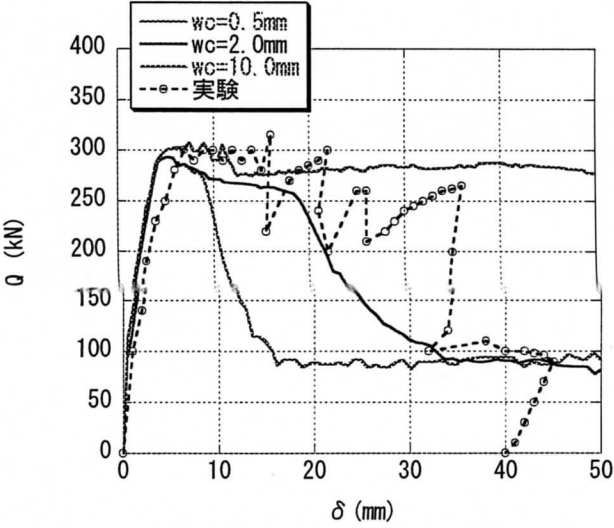


図-11.9 帯筋拘束効果考慮

### 11.3.2 履歴特性について

上に述べた検討結果を基に繰り返し載荷における、履歴性状について表-11.1の各材料を用いて検討した。載荷履歴については図-11.10に示す通りである。Q- $\delta$ 曲線を図-11.11に示す。

普通コンクリートを用いた場合、モデル1に比べ、モデル2、モデル3は最大強度が向上している。これは単純に鉄筋量の違いによるものと考えられる。またモデル2はモデル1やモデル3に比べ変位 30mmの点で大きな荷重を維持できているのが確認できる。これは形状の違いにより、異なる破壊性状が現れたためだと考えられる。しかし、どのモデルを見てもスリップ性状が顕著に現れておりエネルギー吸収部材として好ましい履歴性状でないことは確かである。

次に HFRCC を用いた Q- $\delta$  曲線を見てみると普通コンクリートを用いた場合に比べ、紡錘形の安定した履歴性状が得られた。ただ、モデル2のみでスリップ性状が現れているのが確認できる。これはモデル2でせん断破壊が発生したこと、また、破壊の局所化が発生していることが示唆される。

次に SFRCC を用いた Q- $\delta$  曲線を見てみると、HFRCC を用いた場合に比べ、更にスリップ性状は緩和され横に膨らんだ履歴曲線を描いた。しかし、最大強度が大きく、その後強度が低下した後に安定した履歴を描くという特徴が確認できる。これは材料の強度が大きいことに起因することだと考えられるが、この特徴は、ダンパーとしたときに、フレームに対して大きな損傷を与えてしまう恐れがあるのであまり好ましい履歴性状ではないと考えられる。

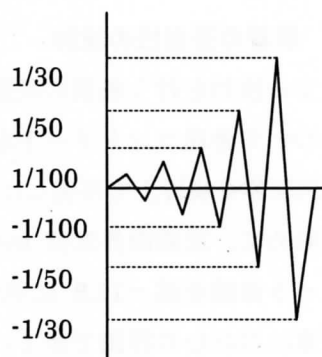
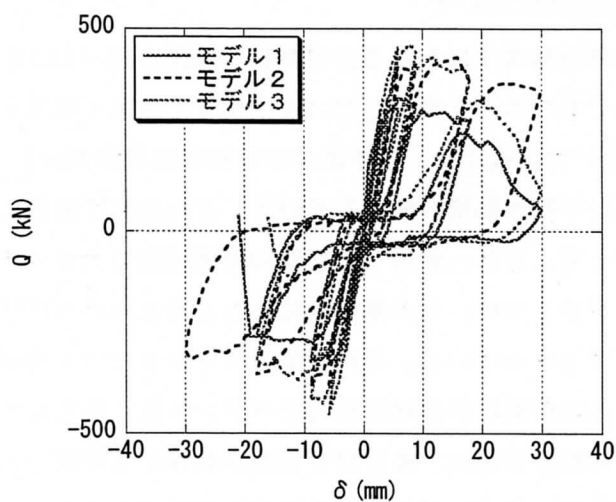
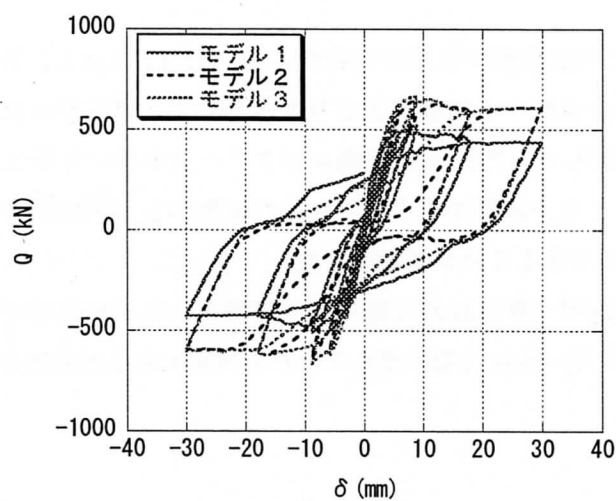


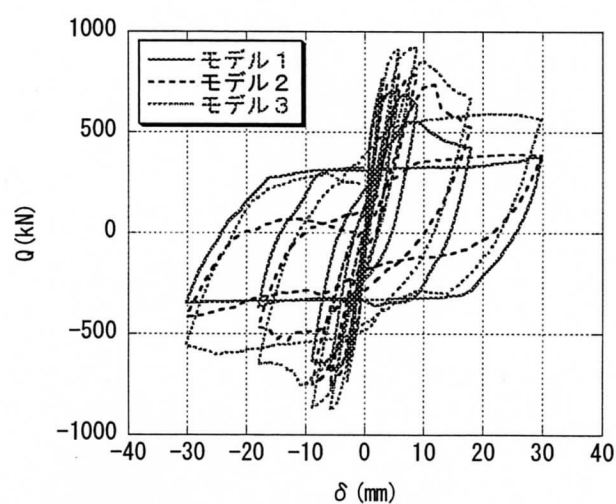
図-11.10 載荷履歴



① 普通コンクリート



② HFRCC



③ SFRCC

図-11.11 Q-δ 曲線

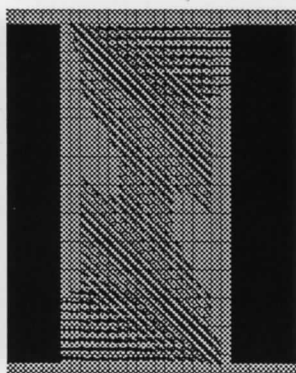


### 11.3.3 ひび割れ状況、鉄筋応力状況について

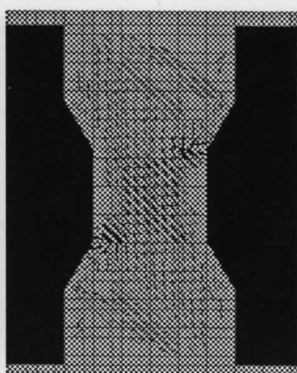
各種材料を用いた各モデルの最大強度点におけるひび割れ状況図を図-11.12 に示す。なおこのひび割れはひび割れ幅 0.2mm 以上のもののみを表示した。まず全体的に見てみると、普通コンクリートを用いた場合に比べ HFRCC を用いた場合では、基本的にひび割れ領域が減少しているのが確認できる。SFRCC を用いた場合では更にひび割れ領域が減少している。これは曲げ変形による引張側のコンクリートの損傷が顕著になったものと考えられ、使用した材料の引張強度の大きさに起因しこのような結果になったと考えられる。またモデル2では、せん断破壊によると考えられるひび割れが部材中心部に集中し、損傷の程度も大きくなってしまっている。それに対しモデル3ではX型配筋による補強効果により、部材中心部の損傷が軽減されひび割れが部材端部までバランス良く分布している。特に HFRCC を用いた場合のモデル3では、せん断ひび割れ、曲げひび割れが共存する形状であると考えられる。またモデル2、モデル3では損傷の集中しやすい部材端部の損傷を軽減できる点でも有効であると考えられる。

次に水平変位を 30mm 与えた時の鉄筋の引張応力状況を図-11.13 に示す。普通コンクリートに比べ HFRCC を用いた場合では応力を負担する領域が広がり大きな応力を鉄筋が負担しているのが確認できる。特にモデル3では中央部に配したX型配筋が普通コンクリートを用いた場合に比べ HFRCC を用いると大きな応力を負担していることが確認できる。これらの結果から HFRCC を用いることで鉄筋により大きな応力を負担させることができることが確認できた。

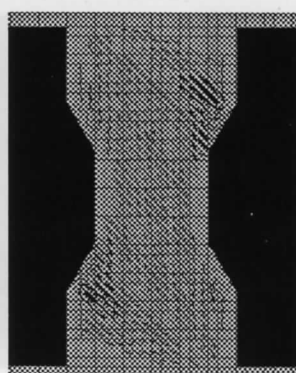
ここまでの検討により、エネルギー吸収部材に適用する材料として HFRCC が有効であること、またモデル1とモデル3によりエネルギー吸収性能に優れた部材を開発できる可能性を見出した。



モデル 1

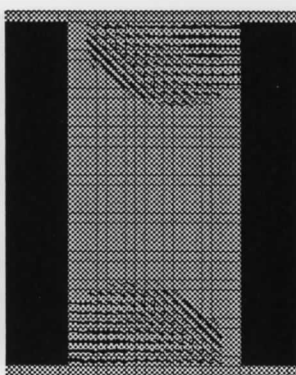


モデル 2

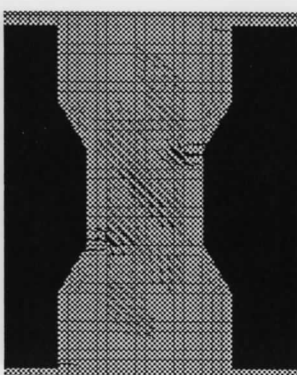


モデル 3

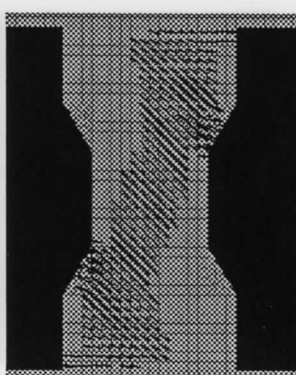
①普通コンクリート



モデル 1

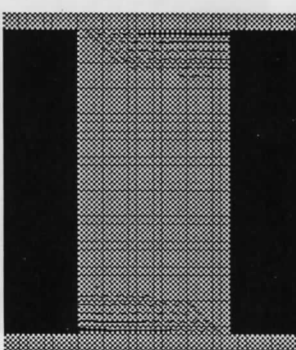


モデル 2

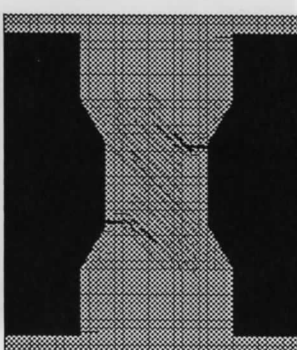


モデル 3

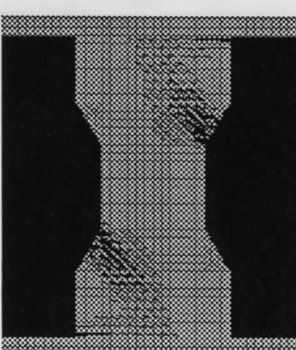
②HFRCC



モデル 1



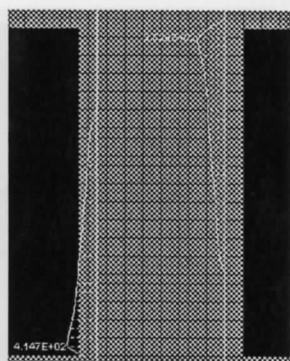
モデル 2



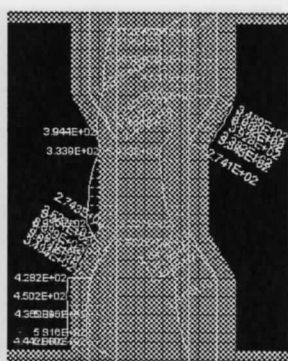
モデル 3

③SFRCC

図-11.12 最大強度点ひび割れ状況



モデル 1

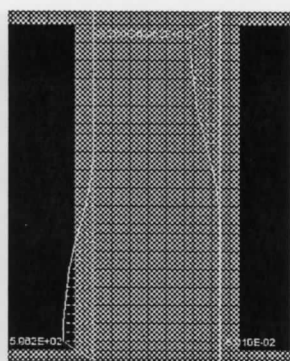


モデル 2

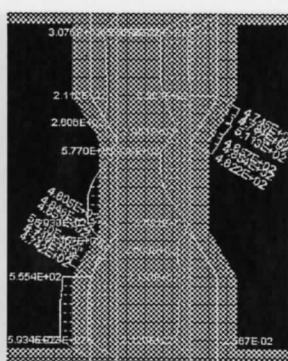


モデル 3

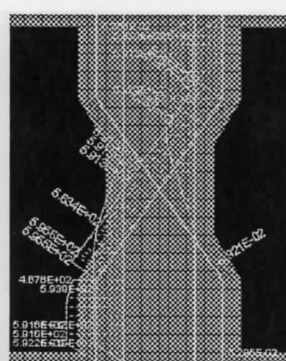
①普通コンクリート



モデル 1

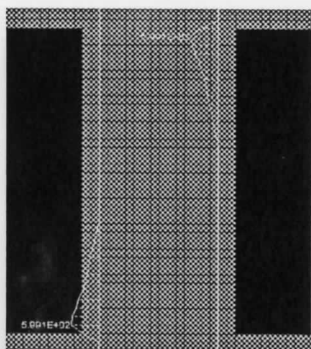


モデル 2

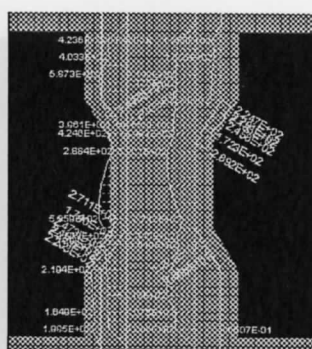


モデル 3

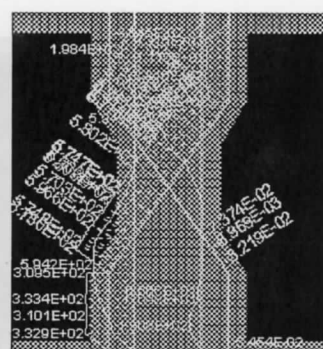
②HFRCC



モデル 1



モデル 2



モデル 3

③SFRCC

図-11.13 鉄筋引張応力状況 (変位+30mm)

第 12 章 エネルギー吸収部材の構造実験

12.1 はじめに

前章の解析による検討により、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料をエネルギー吸収部材に適用することでよりエネルギー吸収性能に優れたエネルギー吸収部材を開発できること、また形状を変化させることにより鉄筋の塑性領域を拡大させ、スタブ部の損傷も軽減できることを確認した。

本章では、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の構造実験を実際に行い、考察、検証する。

12.2. 実験概要

12.2.1 実験概要

図－12.1 に試験体配筋図、表－12.1 に試験体一覧を示す。HFRCC－1A はストレート形状、HFRCC－1AA は HFRCC－1A と同じ形状で軸力比 0.05 の軸力を導入し試験を行った。HFRCC－1B は HFRCC－1AA に対し X 型配筋を 1 対配した試験体であり、HFRCC－3 は前章で検討したモーメント分布を考慮断面を変化させた試験体であり前章のモデル 3 B にあたる。この試験体は X 型配筋が 2 対配してある。これらの試験体により軸力、形状、配筋の影響を確認する。

鉄筋については、エネルギー吸収部材部において、主筋・X 型配筋共に D19（SD345）を使用し、せん断補強筋には D10（SD295）をピッチ 60mm で配してある。スタブ部においては、D22 を 4 本使用し外形を形作り、D16 を縦・横方向にピッチ 150mm で配し補強した。使用した鉄筋は全試験体共通である。

セメント系材料については全試験体共通で、エネルギー吸収部材部に HFRCC、スタブ部に高強度コンクリートを使用した。HFRCC の使用材料を表－12.2、調合を表－12.3 に示す。

表－12.1 試験体一覧

No.	試験体名	断面		軸力比	デバイス 種類	スタブ 種類	主筋(SD345) 配筋	せん断補強筋(SD295)			せん断スパン比 a/D				
		B	D					径	間隔 (mm)	Pw (%)					
		(mm)													
1	HFRCC－1A	210	450	0	HFRCC	高強度コンクリート	4-D19	D10	60	1.13	1				
2	HFRCC－1AA	210	450	0.05			Pg(%)=1.21								
3	HFRCC－1B	210	450	0											
4	HFRCC－3	210	450(300)	0											

表－12.2 HFRCC 使用材料

セメント(C)	三菱マテリアル社製低発熱系シリカフュームセメント
珪砂7号(S)	岐阜県土岐産
高性能AE減水剤(SP)	エヌエムビー社製SP8SBsX2
増粘剤	信越化学工業(株)hiメトロース
消泡剤	サンノブコ(株)社製SNデフォーマー14HP
スチールコード(SC)	東京製綱(株)製
ポリエチレン(PE)	東洋紡績(株)製

表-12.3 HFRCC 調合

	W/B	S (/B)	減水剤 (/B)	増粘剤 (/B)	消泡剤 (/B)	SC (vol.%)	PE (vol.%)
HFRCC	45	40	1.50	0.25	0.10	1.0	1.0

載荷履歴及び加力装置は図-12.2 及び図-12.3 に示す通りである。二方向繰り返し載荷により部材角1/20 まで変形を与えた。

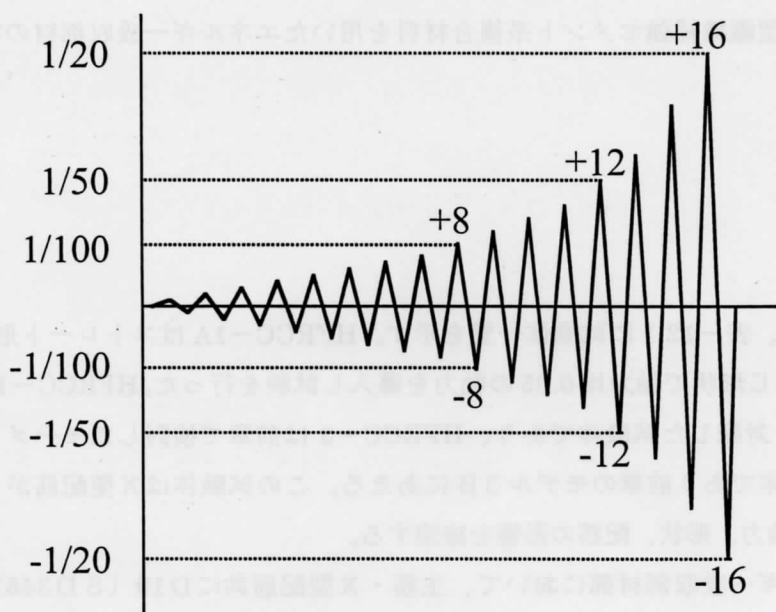


図-12.2 載荷履歴

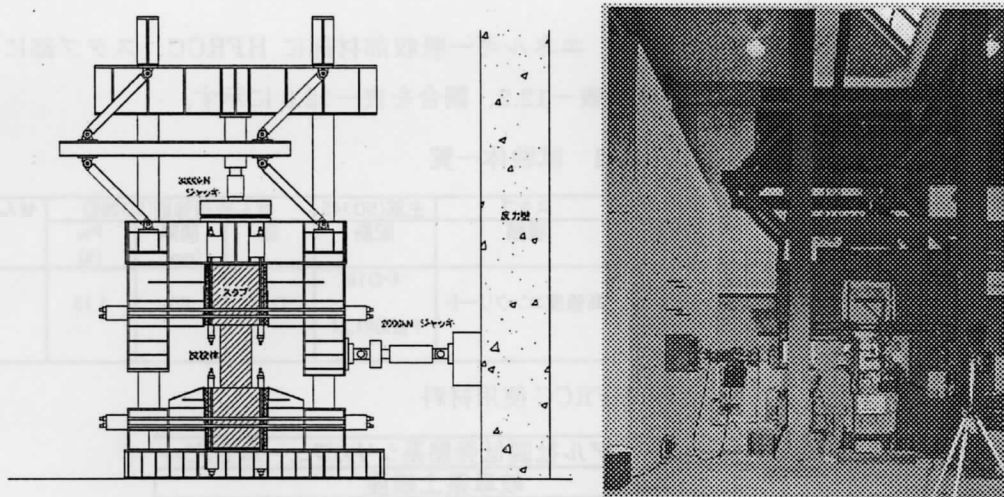
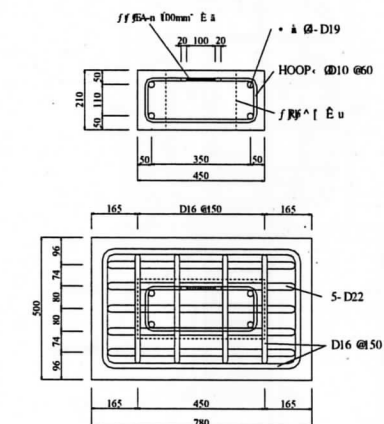
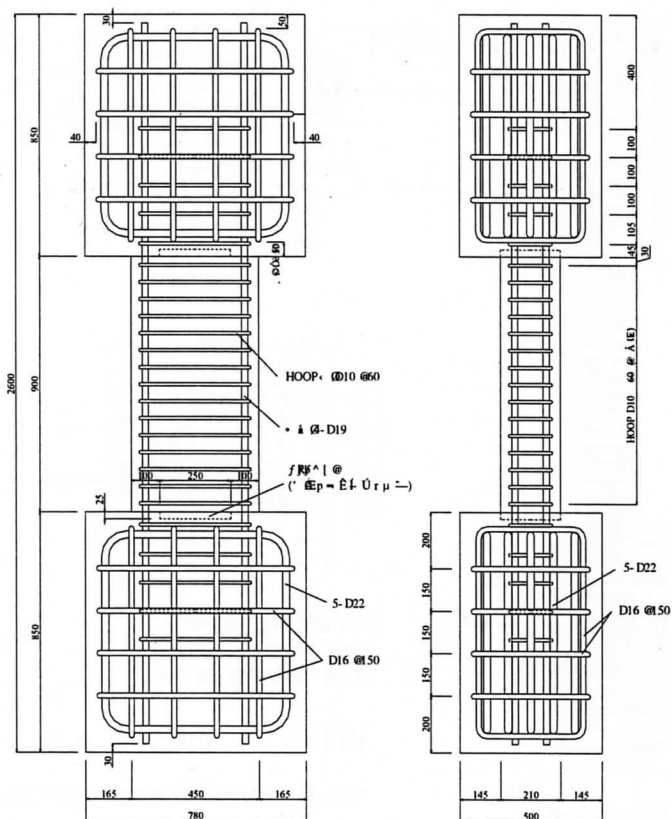


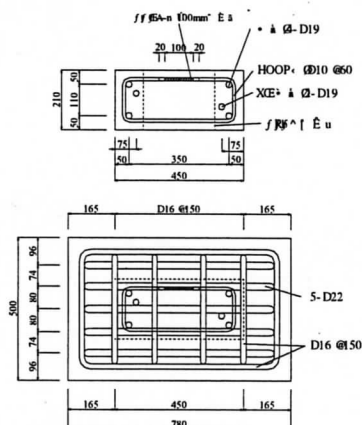
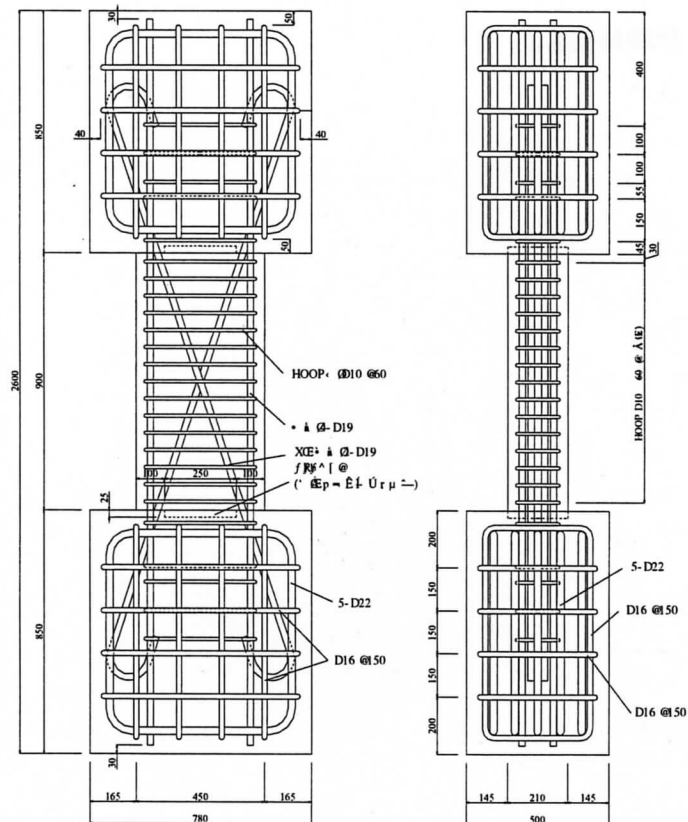
図-12.3 載荷装置概要





•  $\Phi$  D19 (SD345)  
HOOP  $\Phi$ 10 @60 (SD295)

HFRCC-1A @  $\Phi$   $\pm$   $\bar{\Gamma}$   $\Sigma$   $\emptyset$  }  
HFRCC-1AX @  $\Phi$   $\pm$   $\bar{\Gamma}$   $\Sigma$   $\emptyset$  }  
S=1 F0 @@@@02/09/18 @



•  $\Phi$  D19 (SD345)  
X $\Phi$   $\Phi$  D19 (SD345)  
HOOP  $\Phi$ 10 @60 (SD295)

HFRCC-1B @  $\Phi$   $\pm$   $\bar{\Gamma}$   $\Sigma$   $\emptyset$  }

S=1 F0 @@@@02/09/18 @

図-12.1 試験体配筋図



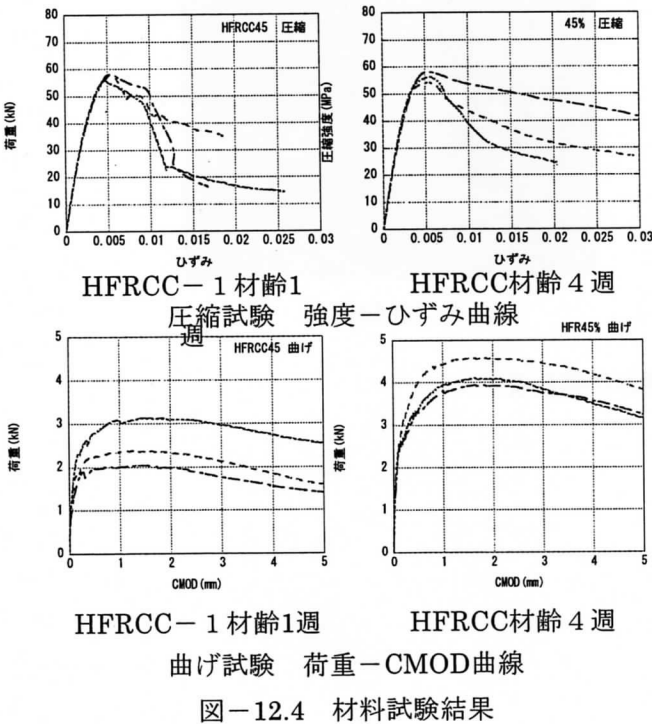
12.2.2 試験体作製

エネルギー吸収部材に使用する HFRCC について、部材として実用することを視野に入れ、施工性などを考慮し、現在まで材料研究レベルで検討してきた使用材料と異なる材料を使用することとした。そこで、試験体を作製する前に使用材料の変更で HFRCC の力学的性能に生じる変化の有無を把握するために、材料試験を行った。使用材料及び調合の変更点を表-12.4 に示す。現在まで材料研究レベルで検討を行ってきた HFRCC を HFRCC-1 エネルギー吸収部材に適用する HFRCC を HFRCC とする。異なる点は、シリカヒュームとセメントを別々でなく、セメントにシリカフュームを吸着させたシリカフュームセメントを使用した点（三菱マテリアル社製低熱系シリカフュームセメント）。高性能 AE 減水剤をポリカルボン酸系に換え、流動性を向上させるとともに鋼繊維の沈降を抑えるために増粘剤を使用し

表-12.4 使用材料及び調合

	HFRCC	HFRCC-1
セメント(C)	三菱マテリアル社製低熱系シリカフュームセメント	宇部三菱マテリアル社製早強ポルトランドセメント
シリカフューム(SF)		エルケムジャパン社製エルケムマイクロシリカ
珪砂7号(S)	岐阜県土岐産	ショーボンド建設㈱製
高性能AE減水剤(SP)	エヌエムビー社製SP8SBsX2	富士薬品工業社製パリックFP200U
増粘剤	信越化学工業㈱hiメトロース	
消泡剤	サンノプロ㈱SNデフォーマー14HP	
スチールコード(SC)	東京製鋼㈱製	
ポリエチレン(PE)	東洋紡績㈱製	東洋紡績㈱製

	W/C	粉体(B)の混合比		S (/B)	減水剤 (/B)	増粘剤 (/B)	消泡剤 (/B)	SC (vol.%)	PE (vol.%)
		C	SF						
HFRCC	45	100		40	1.5	0.25	0.1	1.0	1.0
HFRCC-1		80	20			0	0	1.0	1.0(1.2)

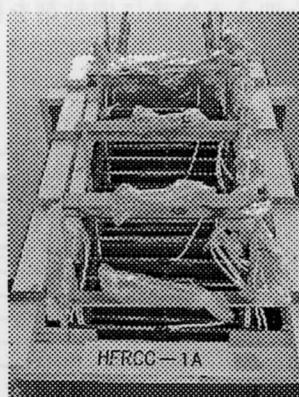


粘性を向上させた点（信越化学工業㈱hiメトロース 0.25%）。繊維の混入にともなうエントラップな空気の巻き込みが多いため（空気量 5～10%）、消泡剤を使用した点（サンノプロ㈱SN デフォーマー14HP 0.1%）。ポリエステルについては、繊維の表面にポリアル樹脂を処理した分散性の高いタイプを使用した点。ただし、樹脂分を見込んで繊維量を割増する（1.2 倍）。養生方法は水中養生ではなく封緘養生とした点。以上の点が挙げられる。

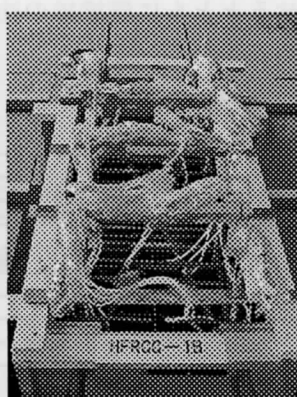
材料試験結果を図-12.4 に示す。圧縮試験では、最大強度が同程度を示し、圧縮靱性は向上した。曲げ試験では、最大曲げ荷

重が向上し、靱性能も HFRCC-1 に比べ遜色のない結果が得られた。これらの結果から、使用材料の変更による、性能の劣化はなく、エネルギー吸収部材に適用する上で問題がないことを確認した。

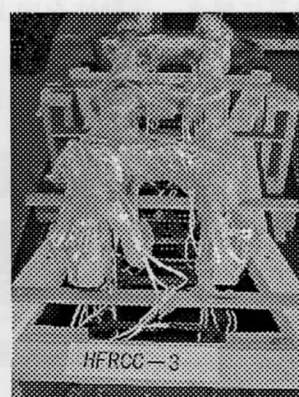
試験体作製状況を図-12.5 に示す。まずエネルギー吸収部材部に HFRCC を打ち込み作製し、その3日後にスタブ部のコンクリートを打ち込み試験体を作製した。エネルギー吸収部材とスタブ部のスリップを抑制するためコッターを設け、表面を目荒らしし、繊維を出した状態で打ち継ぐことでスタブとの密着を図った。



HFRCC-1A



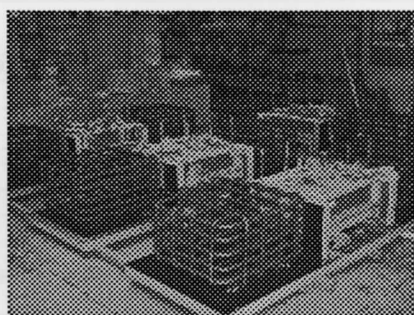
HFRCC-1B



HFRCC-3



コッターの目荒らし状況



スタブ部配筋

図-12.5 試験体作製状況

12.3 実験結果及び考察

12.3.1 履歴性状

実験により得られた水平荷重-部材角関係を図-12.6に示し、実験結果一覧を表-12.5に示す。

HFRCC-1Aでは部材角 1/20 の変形まで耐力の低下はないものの、除荷時に大きくスリップする性状を示した。耐力を維持できるのは HFRCC が大きなひび割れの発生を抑制し、鉄筋からの剥離、剥落を抑制したためだと考えられる。実際にもエネルギー吸収部材部には細かいひび割れが多数発生した。しかし、スタブ部に鉄筋の引き抜きによると考えられるひび割れが発生した後は、エネルギー吸収部材部に発生するひび割れの量は極端に減少し、スタブ部のひび割れのみが進展していった。その結果、エネルギー吸収部材部が立方体の剛体のようになり、左右の変形を受ける形となった。

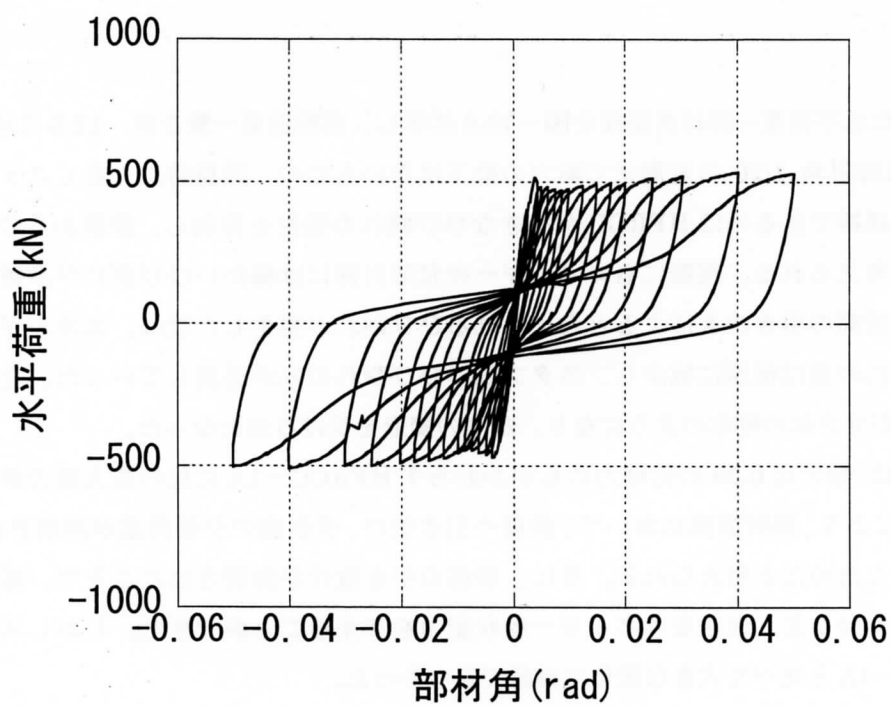
HFRCC-1AAでは、軸力比 0.05 の低軸力にもかかわらず HFRCC-1A に比べ最大耐力が向上した。これは、軸力の導入により、部材断面において、鉄筋の引き抜け、引張側の引張荷重が抑制され、HFRCC の圧縮領域が拡大したためだと考えられる。更に、鉄筋の引き抜けが抑制されたことで、再載荷時の履歴の立ち上がりが早くなりより大きなエネルギー吸収能力を与えることができた。しかしスリップ性状については HFRCC-1A と比べて大きな変化は確認できなかった。

HFRCC-1Bでは HFRCC-1A に比べスリップ性状が緩和されている。これはX型配筋を配したためだと考えられる。最大耐力の向上は主筋量の影響であると言えるだろう。

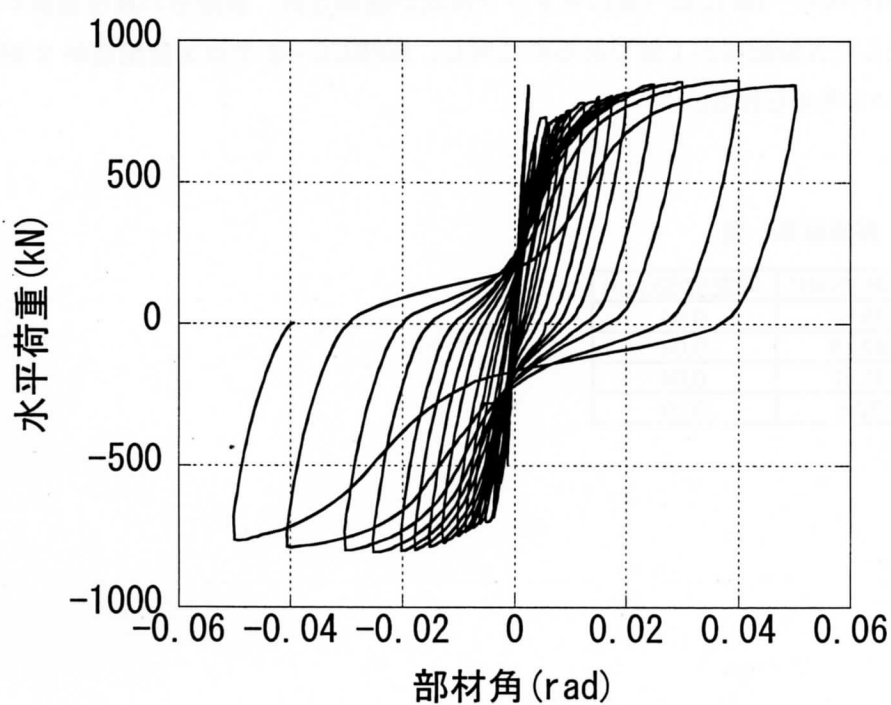
HFRCC-3では HFRCC-1B に比べ更にスリップ性状が緩和され、紡錘形の履歴曲線が得られた。HFRCC-1Bでは配したX型配筋が1対であるのに対し、HFRCC-3ではX型配筋が2対配してあるのでその影響が大きいと考えられる。

表-12.5 実験結果一覧

	最大耐力(kN)	同左変位(rad)
HFRCC-1A	538.86	0.04
HFRCC-1AA	862.28	0.04
HFRCC-1B	746.62	0.04
HFRCC-3	837.8	0.05



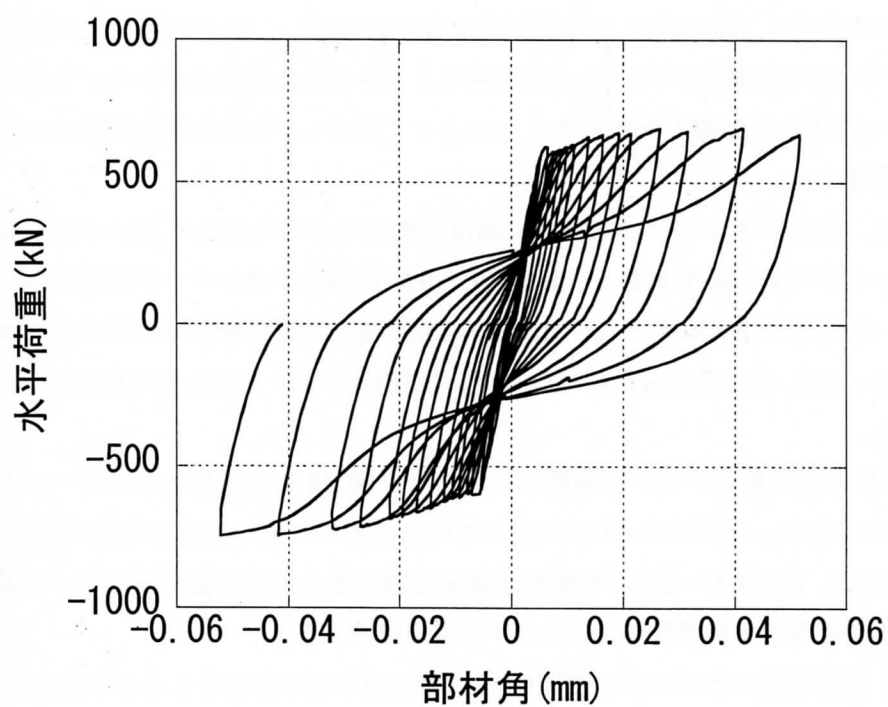
HFRCC-1A



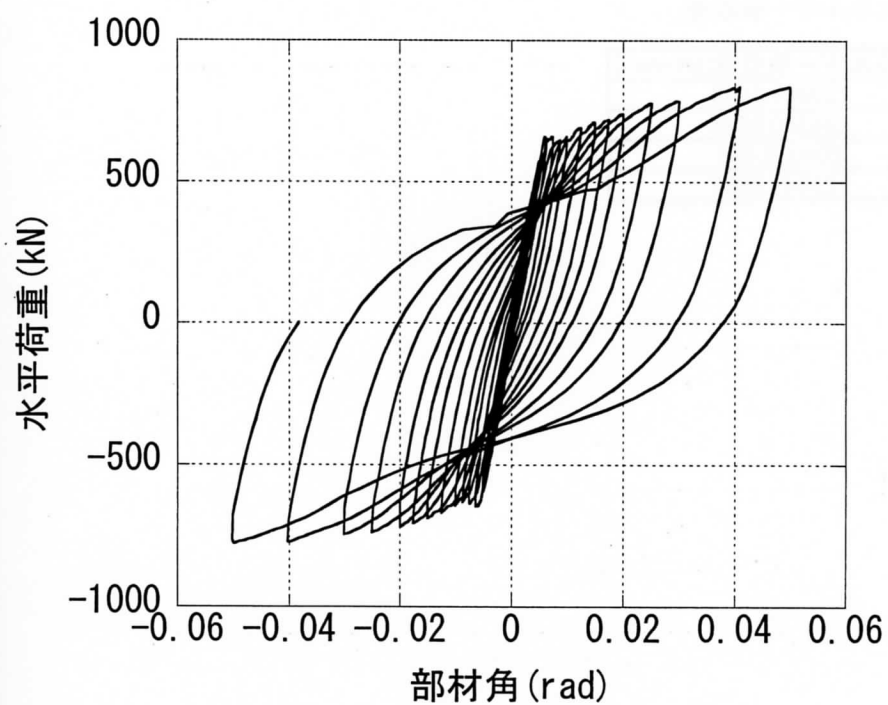
HFRCC-1AA

図-12.6 荷重-部材角関係





HFRCC-1B



HFRCC-3

図-12.6 荷重一部材角関係

### 12.3.2 消費エネルギー及び等価粘性減衰定数

図-12.7 に消費エネルギー、図-12.8 に等価粘性減衰定数を示し、表-12.6 に総エネルギー吸収量を示す。消費エネルギーは各試験体の曲げせん断実験により得られた履歴曲線から、各载荷サイクルごとに履歴曲線によって囲まれた面積を計算することによって算出し、等価粘性減衰定数は図-12.9 に示す計算方法によって算出した。

図-12.7 によれば、消費エネルギーは部材角にほぼ比例するように増大しているのが確認できる。HFRCC-3 の消費エネルギーが最も大きく、HFRCC-1A の消費エネルギーが最も小さいという結果となった。HFRCC-1AA 及び HFRCC-1B では正方向载荷時と負方向载荷時で消費エネルギーの大きさが異なり、HFRCC-1AA では正方向载荷時の方が、HFRCC-1B では負方向载荷時の方が大きい消費エネルギーを示した。

図-12.8 の等価粘性減衰定数のグラフを確認してみると、図 12.7 の消費エネルギーのグラフとおおむね同様の傾向があらわれた。HFRCC-3 は大きな部材角に対して最も大きな等価減衰定数を示した。小さい部材角においては、HFRCC-1A の等価減衰定数が最も大きい値を示しているが、部材角が大きくなっていても等価粘性減衰定数は向上しないのが確認できる。

これらの結果から、履歴性状においては HFRCC-3 が最も良い性状とすることができる。

表-12.6 総エネルギー吸収量

	総エネルギー吸収量(kN・mm)
HFRCC-1A	120989.3449
HFRCC-1AA	224350.0594
HFRCC-1B	201036.486
HFRCC-3	229847.2637

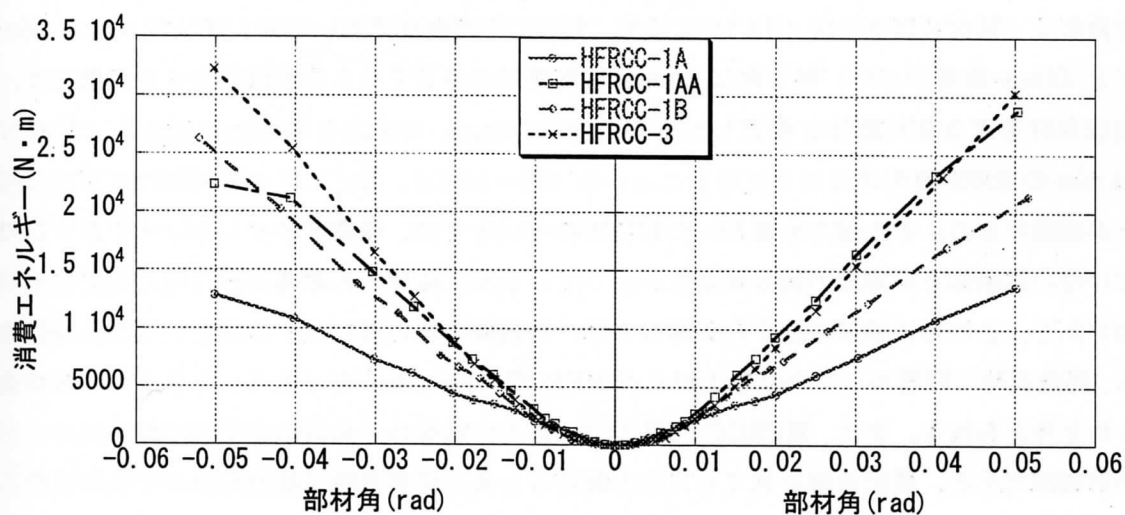


図-12.7 消費エネルギー

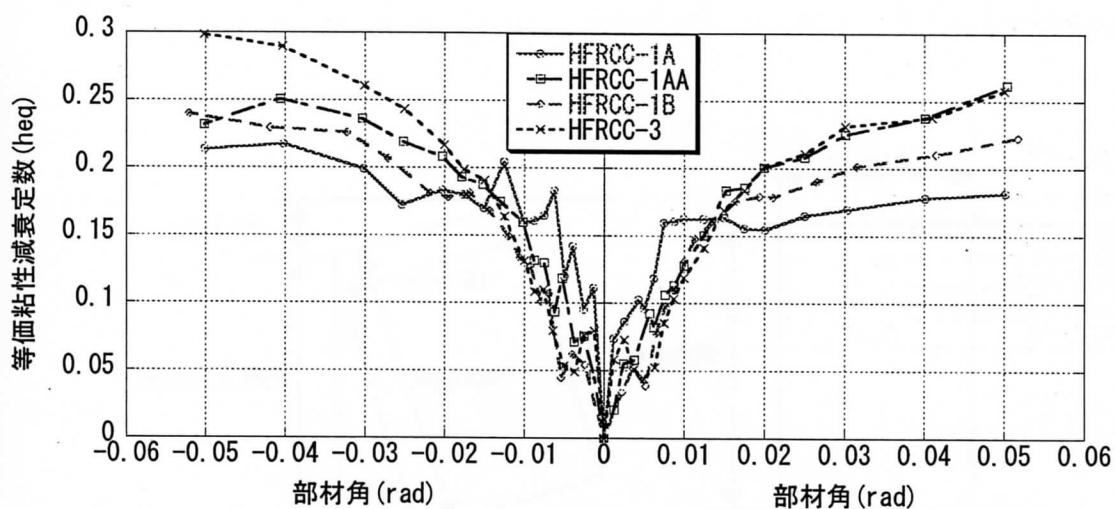
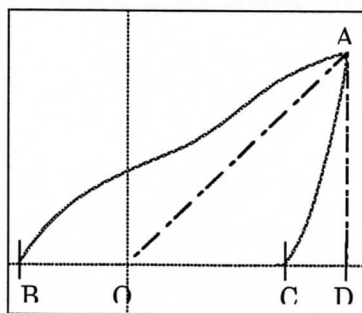


図-12.8 等価粘性減衰定数

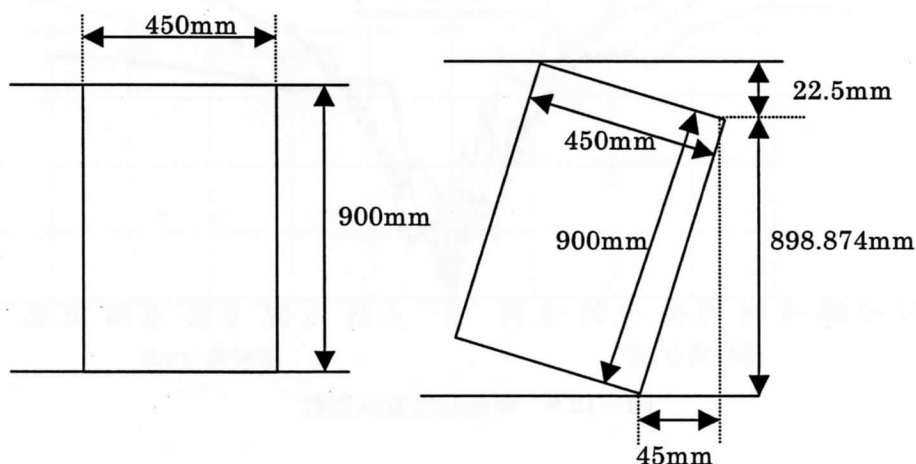


$$heq = 1/2 \pi \cdot \text{面積 } ABCA / \text{面積 } OAD$$

図-12.9 等価粘性減衰定数の算出方法

### 12.3.3 軸方向変位

軸方向変位－部材角関係を図－12.10 に示す。すべての試験体において最大部材角  $0.02$  ( $1/50$ )、変位に直すと  $45\text{mm}$  程度の点で、軸方向に  $20\text{mm}$  程度変形が生じているのが確認できる。例えば、エネルギー吸収部材を直方体の剛体と仮定して水平方向に  $45\text{mm}$  の変位を与えたとすると、鉛直方向に約  $21.374\text{mm}$  の変形が発生することになることから (図－12.11)、曲げによる引張側の変形が卓越していることが確認できる。また軸力を導入した HFRCC-1AA では、载荷サイクルのピーク点では軸力を導入していない試験体と同程度の軸方向変位が生じているが、除荷・再载荷の再軸方向変位が戻るのが特徴的である。この再鉄筋のひずみが解放され、再载荷の際に再びひずみが生じるため履歴性状においても、再载荷時の履歴ループの立ち上がりが HFRCC-1A に比べ早くなり、エネルギー吸収量が大きくなったと考えられる。また、HFRCC-1B では、正方向载荷時と負方向载荷時で軸方向の変形量が異なるのが確認できる。履歴曲線を見ても正方向载荷時と負方向载荷時で履歴曲線の形状が異なるのはこれが原因だと考えられる。つまり正方向载荷時は軸方向変形量が比較的小さいことから、引張側の鉄筋に新しいひずみが生じにくくなったため、負方向载荷時に比べ履歴曲線の立ち上がりが遅くなったと考えられる。



図－12.11 剛体仮定による変形

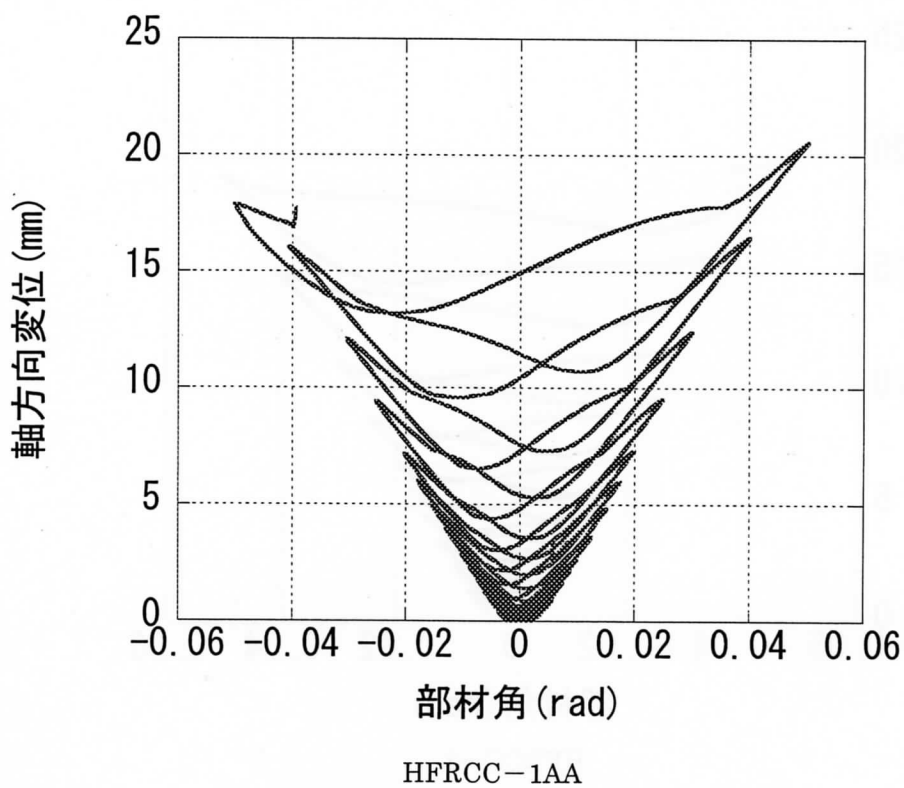
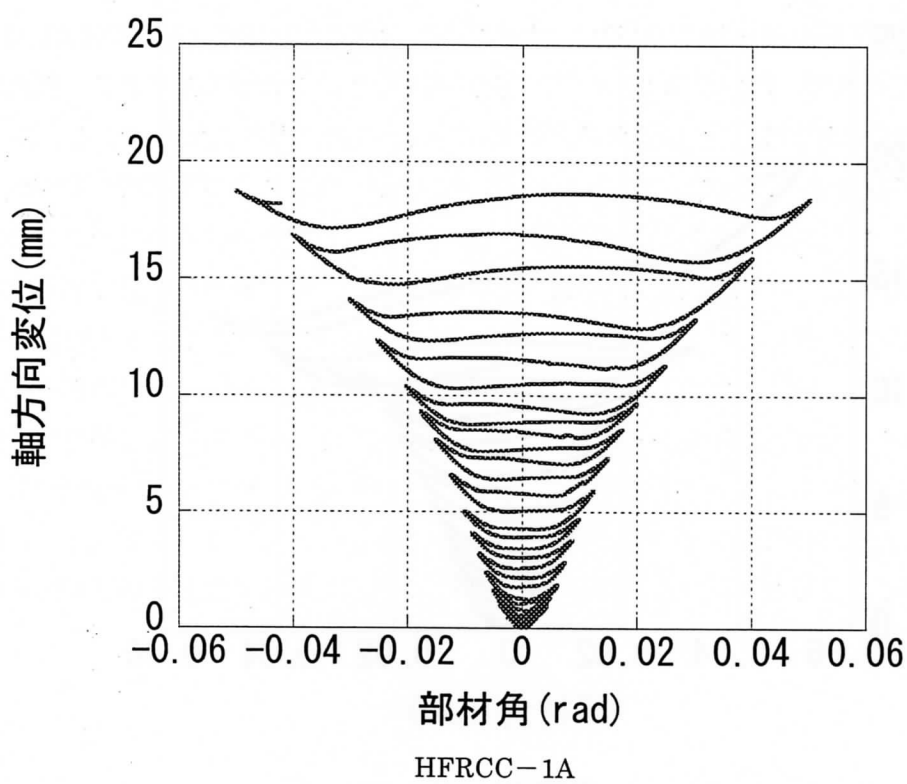
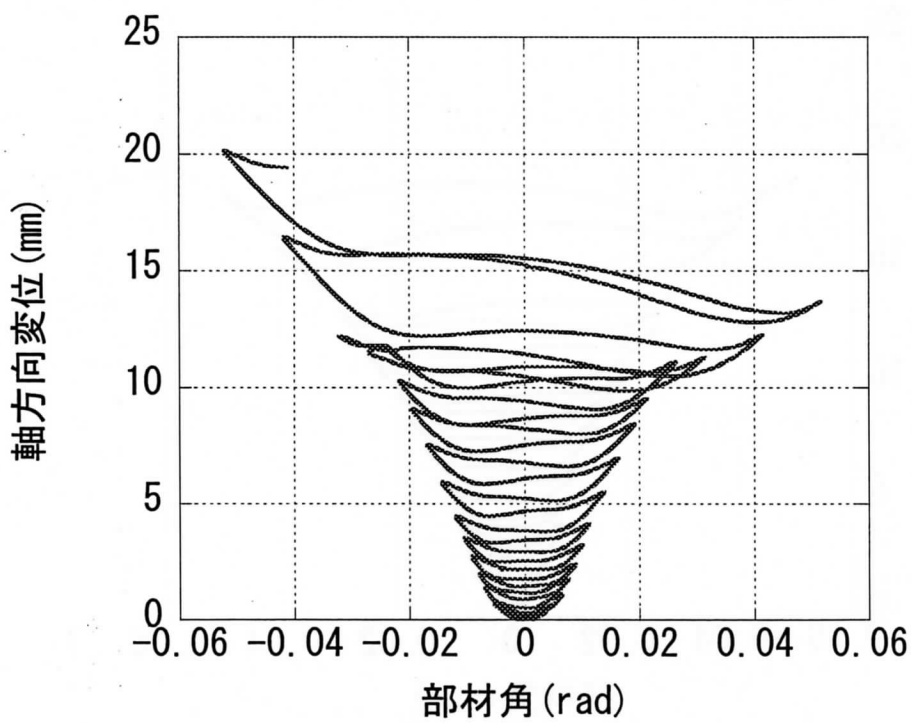
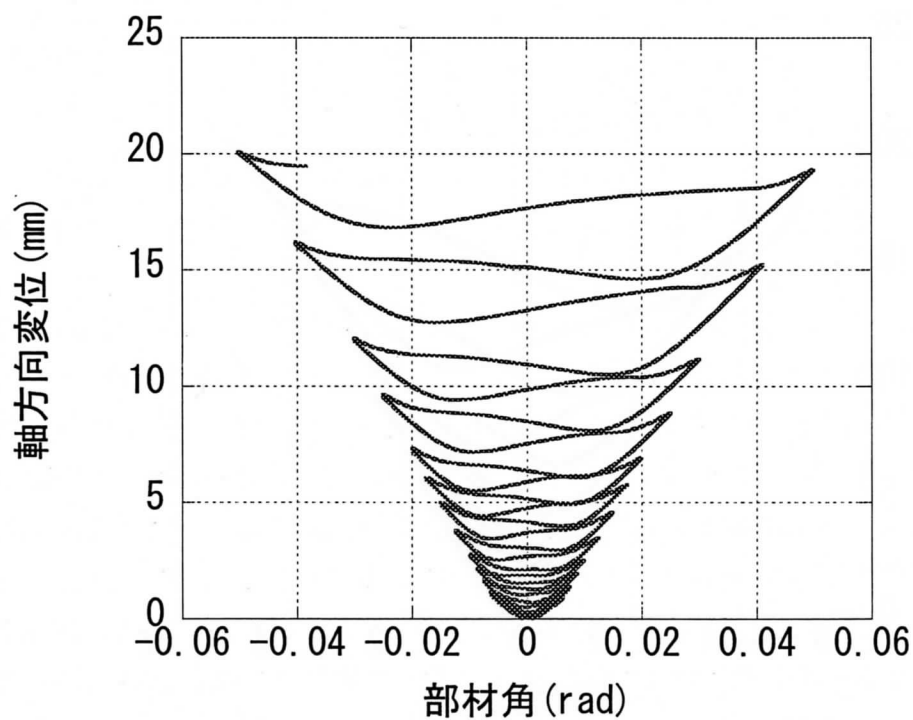


図-12.10 軸方向変位-部材角関係



HFRCC-1B



HFRCC-3

図-12.10 軸方向変位一部材角関係



## 12.3.4 鉄筋ひずみ

### 12.3.4.1 主筋ひずみ状況

HFRCC-1A におけるひずみ測定箇所を図-12.12 に示す。データを取った鉄筋は、試験体正面に向かって右側の主筋であり、一本の鉄筋の左右にひずみゲージを貼り付けデータを採取した。1～6 の番号はゲージを貼り付けた場所を示す。他の試験体では形状が異なるものの測定した場所は同じなので割愛する。

ひずみ分布状況を図-12.13 に示す。このグラフは載荷履歴におけるピーク点のひずみを取り、鉄筋の左右で発生したひずみの平均値を取り、単純に線で繋げたグラフである。

すべてのグラフにおいて基本的に正載荷時では、試験体上部に貼り付けたひずみゲージ（1～2）において引張ひずみが発生し、負載荷時では、試験体下部に貼り付けたひずみゲージ（4～6）において引張ひずみが発生しており、曲げによる引張ひずみが顕著に現れているのが確認できる。また試験体中心部に貼り付けたひずみゲージ（3）では、すべての試験体において変形が大きくなっていてもひずみがほとんど進行していないのも確認できる。また、引張側鉄筋のひずみが塑性ひずみに達するまでは繰り返し載荷に従って、圧縮側の鉄筋には圧縮ひずみが生じ、引張側の鉄筋には引張ひずみが生じているのに対し、引張側鉄筋のひずみが塑性ひずみに達した後は、圧縮側の鉄筋にも引張ひずみが生じ、試験体全体が上側に引っ張られるような挙動を示すのが確認できる。

試験体による違いに着目してみると、軸力を導入した HFRCC-1AA 試験体のみで圧縮により塑性ひずみに達しているのが確認できる。これは軸力の導入により引張側鉄筋のひずみの進行が抑制され塑性化を防いだために、圧縮側鉄筋のひずみが進行したものと考えられる。また、HFRCC-3 の試験体以外では、試験体端部（1、5、6）のひずみが卓越しているのに対し、HFRCC-3 では試験体端部（1、5、6）だけではなく 2、4 の部位においても引張ひずみが発生し塑性ひずみに達しているのが確認できる。これは試験体中心部の断面形状を小さくしたことによって変形が分散したためだと考えられる。このことから HFRCC-3 が更に大きな変形に対しても耐力を維持できることが示唆される。HFRCC-1A に対し X 型配筋を配した HFRCC-1B では主筋のひずみにおいて HFRCC-1A と顕著な違いは確認できない。図-12.14 に高さ方向を軸にとった主筋ひずみ状況を示すが、こちらでも同様の結果が確認できる。

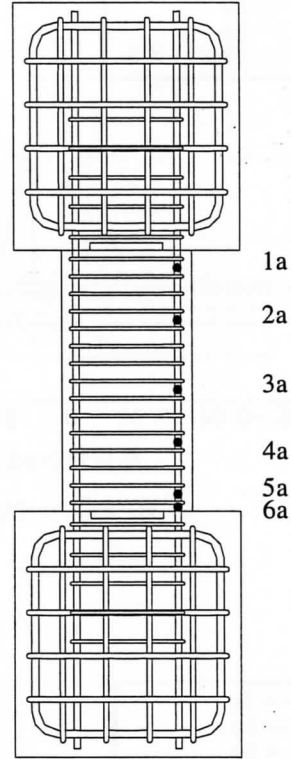
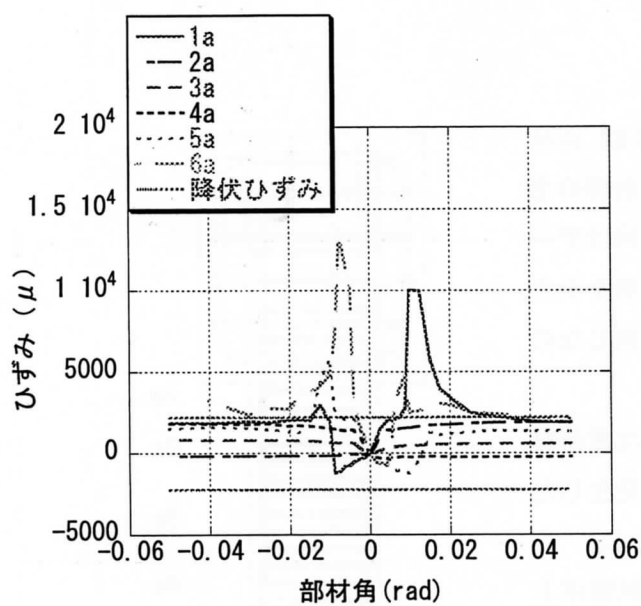
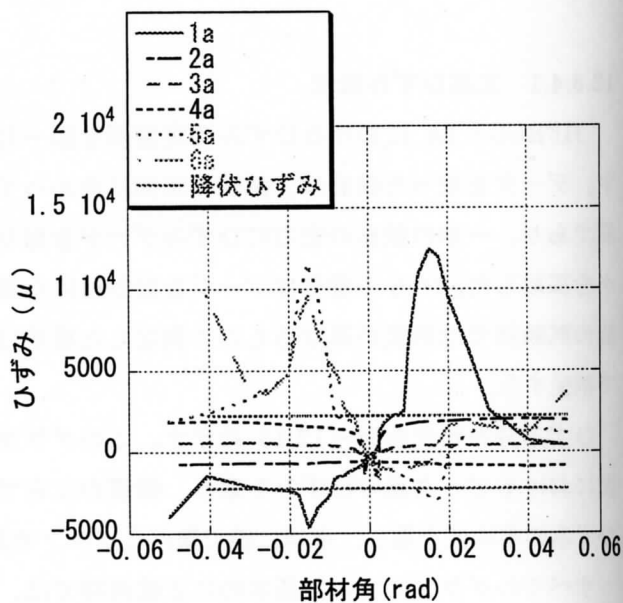


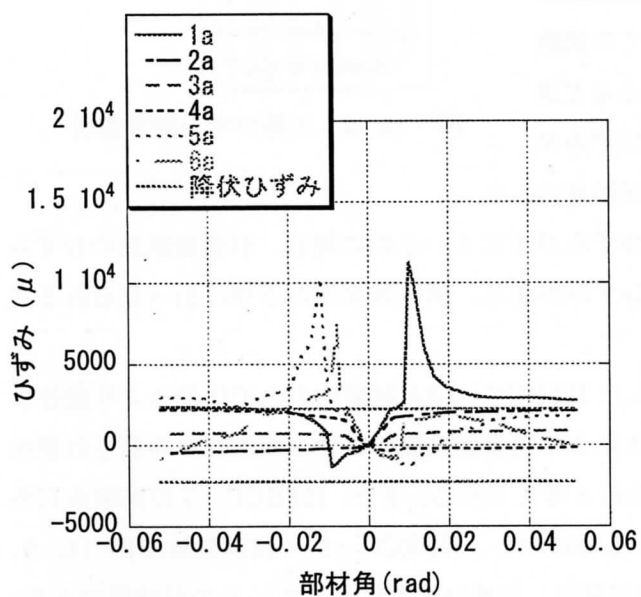
図-12.12 主筋ひずみ測定箇所



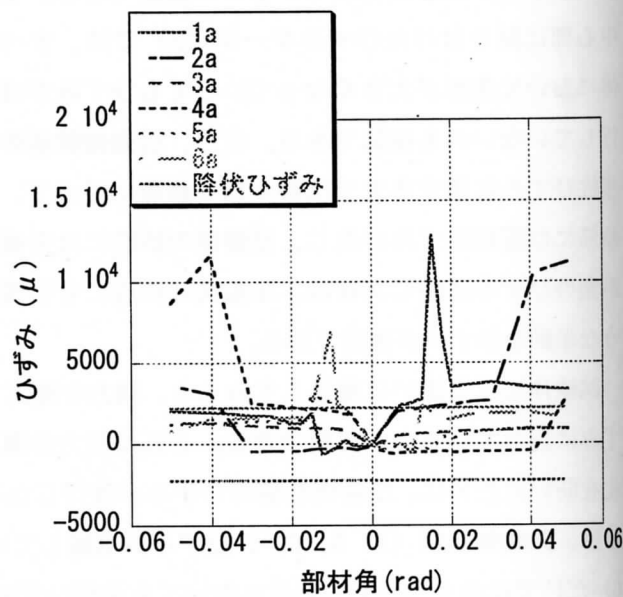
HFRCC-1A



HFRCC-1AA



HFRCC-1B



HFRCC-3

図-12.13 主筋ひずみ状況

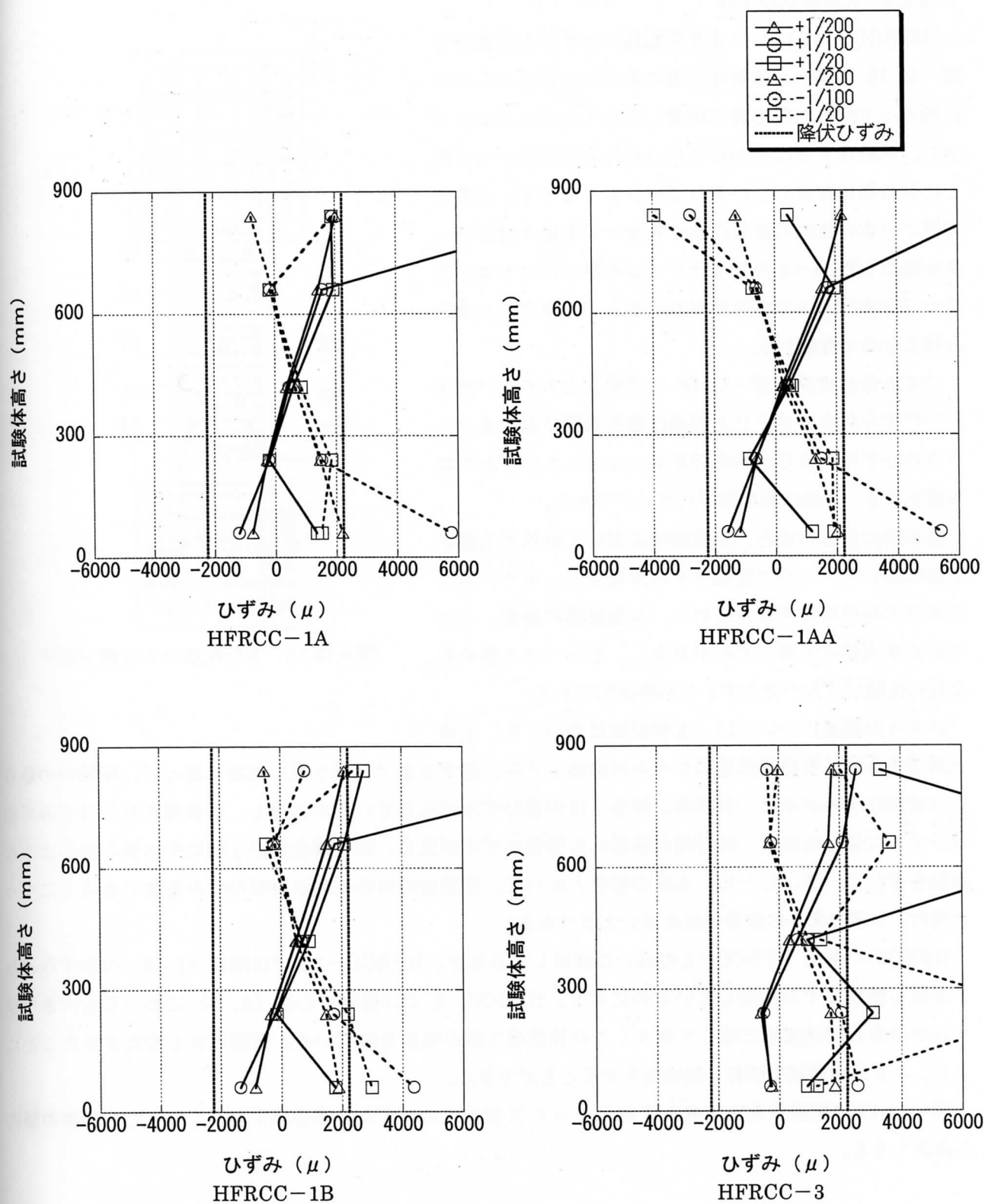


図-12.14 主筋ひずみ状況

#### 12.3.4.2 X型配筋ひずみ

HFRCC-1B における X 型配筋のひずみ測定箇所を図-12.15 に示す。試験体正面に向かって右上から左下に向かって配した斜め筋に設置したひずみゲージを X で示し。試験体正面に向かって左上から右下に向かって配した斜め筋に設置したひずみゲージを Y で示す。主筋と同様に一本の鉄筋の左右にひずみゲージを貼り付けデータを採取した。1~6 の番号はゲージを貼り付けた場所を示す。HFRCC-3 では形状が異なるものの測定した場所は同じなので割愛する。

ひずみ分布状況を図-12.16 に示す。このグラフは主筋のひずみ分布のグラフと同様に載荷履歴におけるピーク点のひずみを取り、鉄筋の左右で発生したひずみの平均値を取り、単純に線で繋げたグラフである。

基本的に主筋の場合、正載荷時において鉄筋の上部と下部において、一方で圧縮ひずみが発生し、もう一方で引張ひずみが発生するのに対し、X 型配筋の場合、一方の斜め筋全体に引張ひずみが発生し、もう一方の斜め筋全体に圧縮ひずみが発生するのが特徴的である。

ひずみの進展については、X 型配筋においても、主筋と同じように、引張側鉄筋のひずみが塑性ひずみに達するまでは繰り返し載荷に従って、圧縮側の鉄筋には圧縮ひずみが生じ、引張側の鉄筋には引張ひずみが生じているのに対し、引張側鉄筋のひずみが塑性ひずみに達した後は、圧縮側の鉄筋にも引張ひずみが生じ、試験体全体が上側に引っ張られるような挙動を示している。しかし、主筋の場合と比べて、圧縮側の斜め鉄筋が引張ひずみを生じるようになった時の、引張ひずみの度合いは小さいようである。

HFRCC-1B と HFRCC-3 の違いに着目してみると、HFRCC-1B では端部 (1、6) のひずみのみが進展し塑性ひずみに達しているのに対し、HFRCC-3 では部材中心部 (2、3) においても大きなひずみが発生し塑性領域に達しており、この特徴は主筋の場合と似ている。断面形状を変化させたことにより、より広い領域で鉄筋を塑性化させることができた。

図-12.17 に試験体高さ方向を Y 軸にとった X 型配筋のひずみ分布を示すが、こちらでも同様の傾向が確認できる。

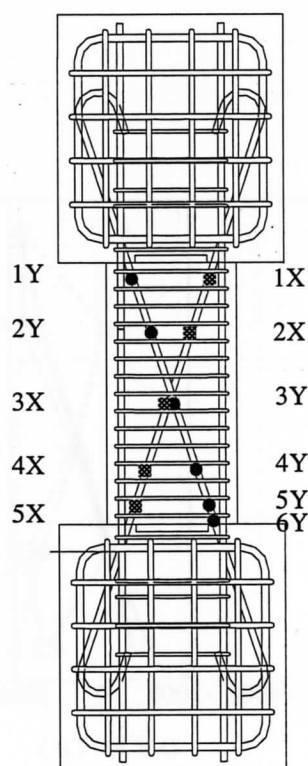
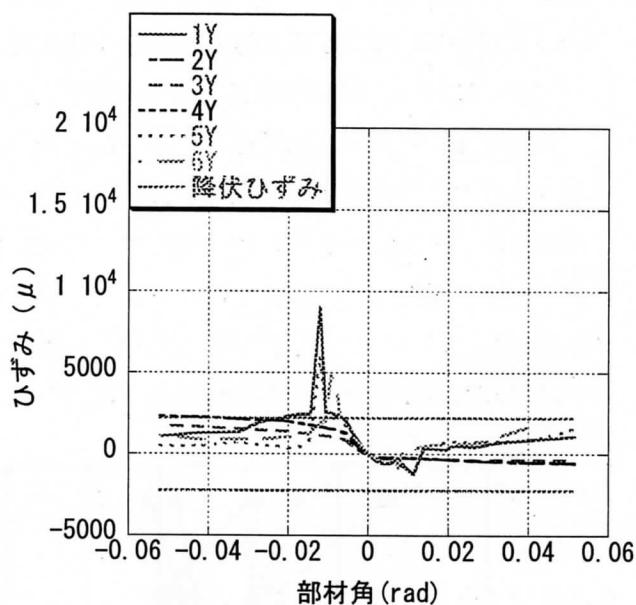
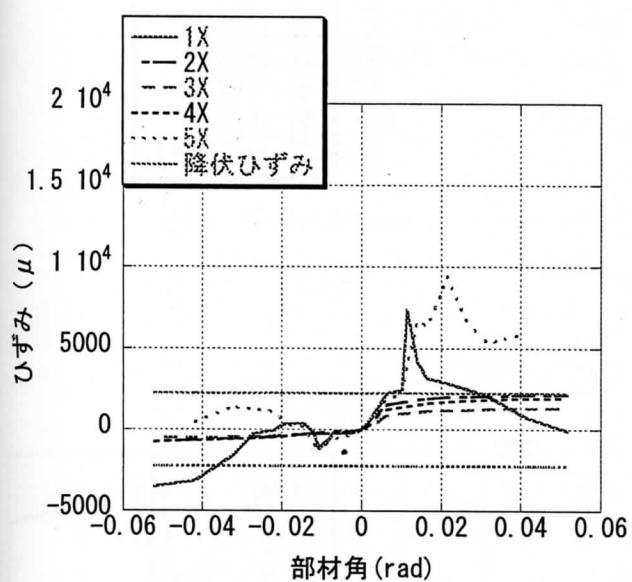
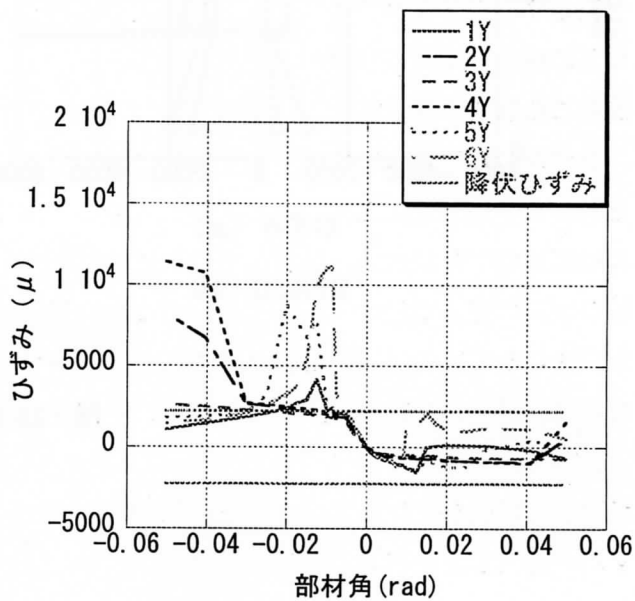
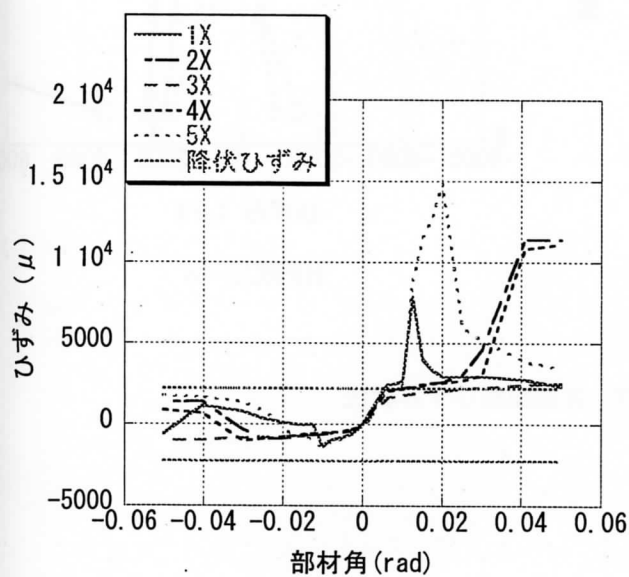


図-12.15 X型配筋ひずみ測定箇所



HFRCC-1B



HFRCC-3

図-12.16 X型配筋ひずみ状況

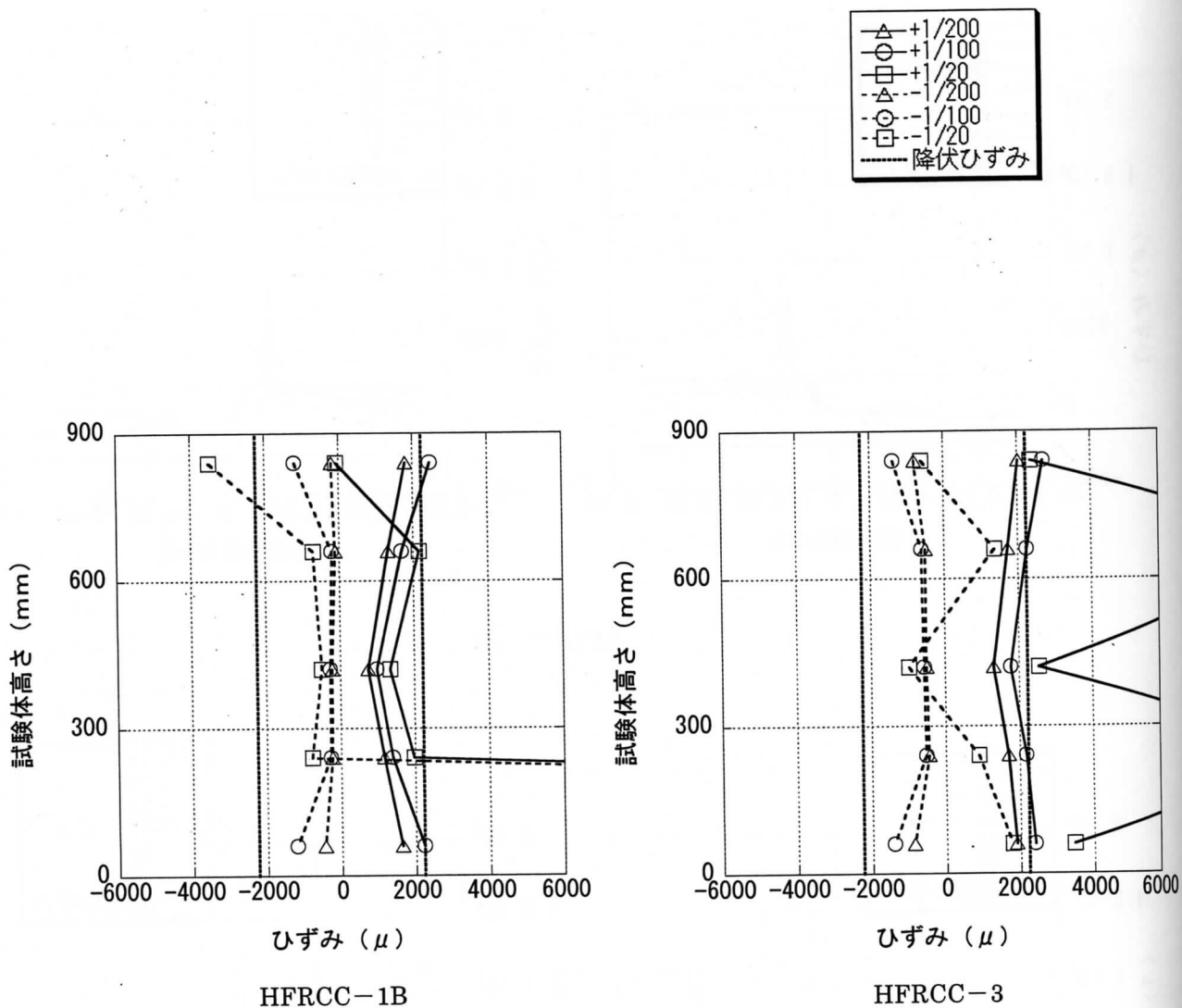


図-12.17 X型配筋ひずみ状況



12.3.4.3 セン断補強筋ひずみ

HFRCC-1A におけるひずみ測定箇所を図-12.18 に示す。セン断補強筋の試験体正面に設置したひずみゲージをF (1~5) で示し、試験体側面に設置したひずみゲージをS (1~5) で示す 1~5 の番号は設置した場所を示す。他の試験体においてもひずみを測定した場所は同じである。

セン断補強筋ひずみ分布を図-12.19 に示す。このグラフは主筋のひずみ分布のグラフと同様に荷履歴におけるピーク点のひずみを取り、単純に線で繋げたグラフである。

セン断補強筋の試験体正面側のひずみ (F) はほとんど変化がなく塑性レベルに達したのは HFRCC-3 の 1F のひずみのみだった。比較的大きなひずみが発生したのは試験体側面のひずみで、試験体端部 1、5 では塑性レベルに達しているものもあるのが確認できる。これらの結果から、セン断補強筋の密な配筋と、HFRCC の効果によりセン断破壊の発生は防ぐことができたと考えられる。

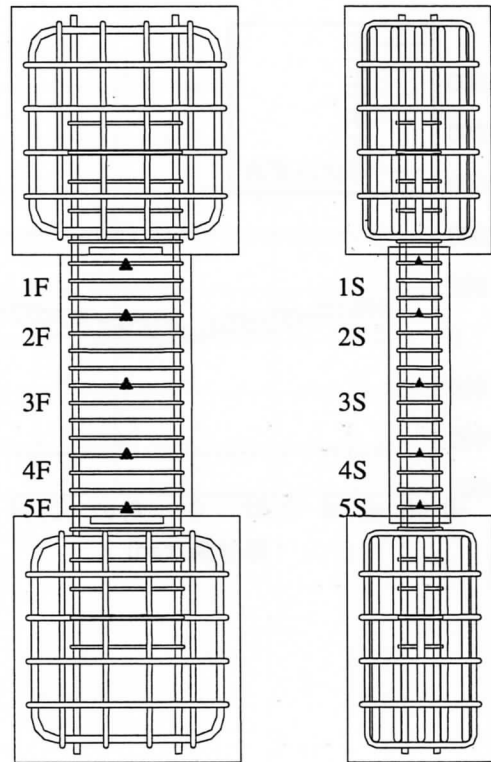
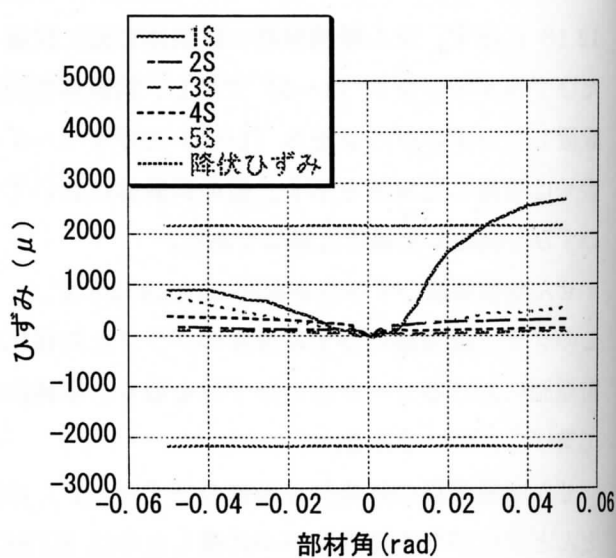
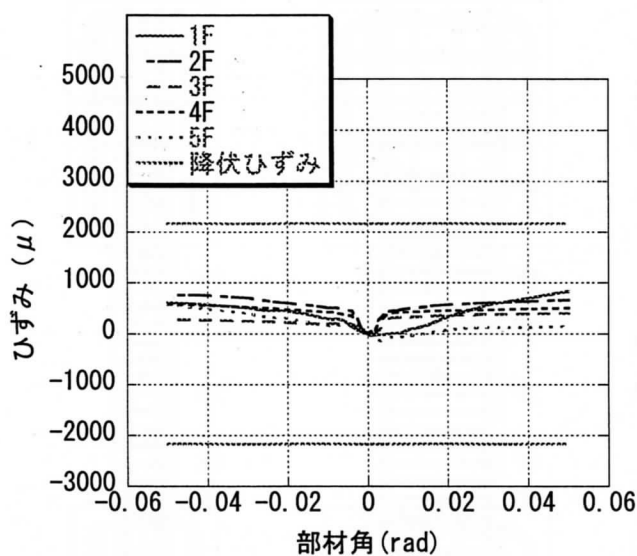
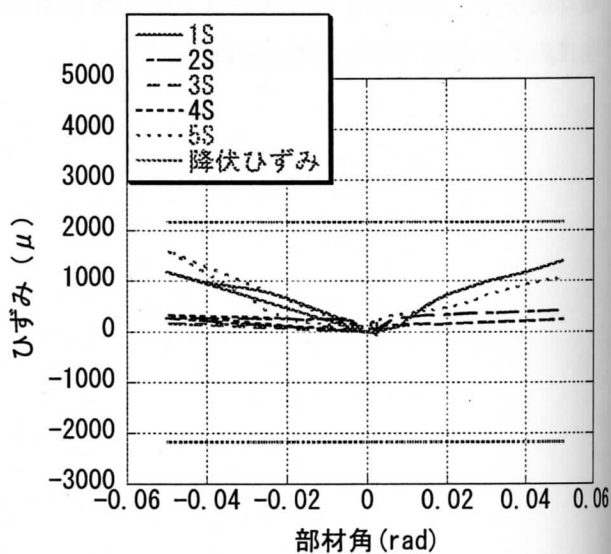
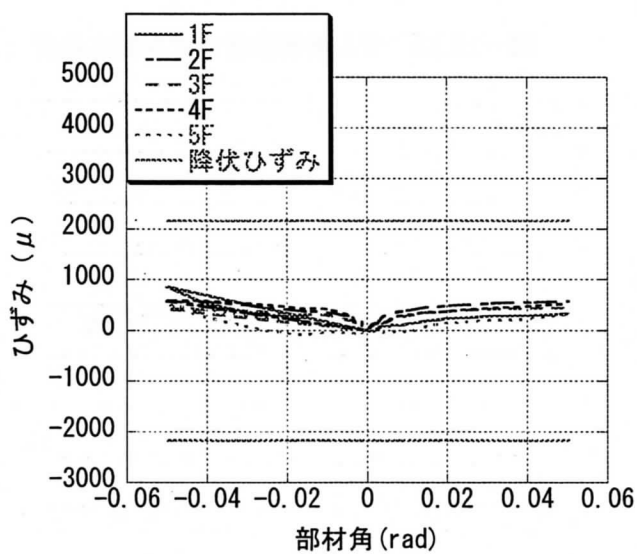


図-12.18 セン断補強筋ひずみ測定箇所

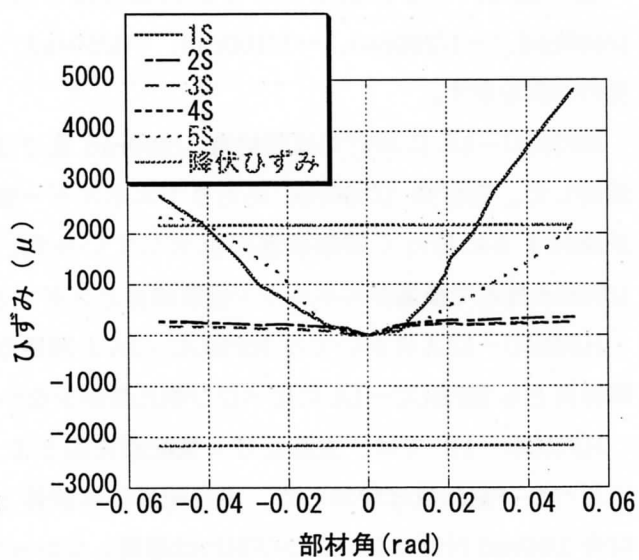
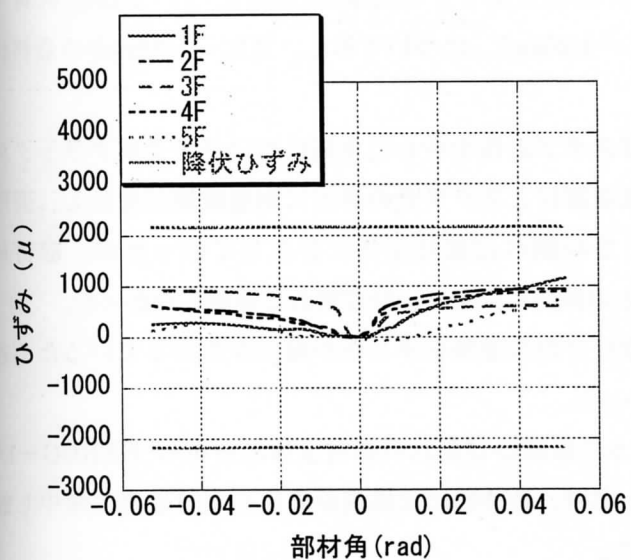


HFRCC-1A

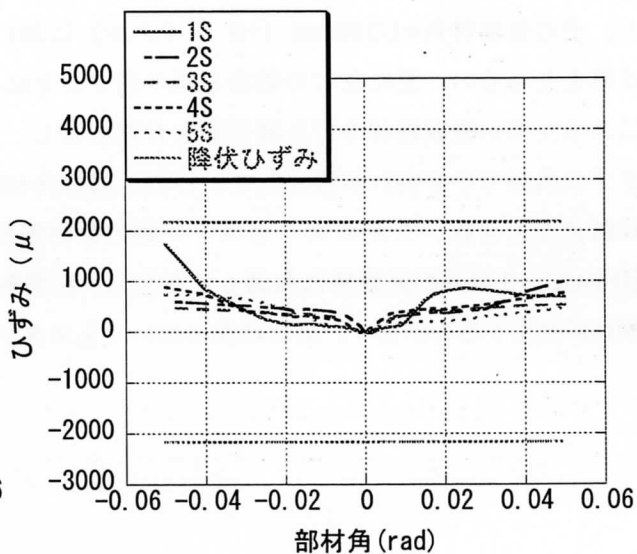
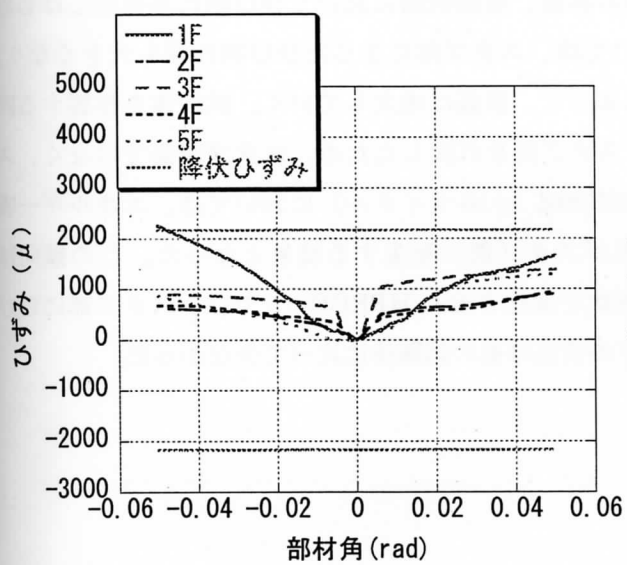


HFRCC-1AA

図-12.19 セン断補強筋ひずみ状況



HFRCC-1B



HFRCC-3

図-12.19 セン断補強筋ひずみ状況

### 12.3.5 破壊進展状況

図-12.20 に各試験体のひび割れ進展及び最終状況を示す。ひび割れ進展については部材角 $-1/400\text{rad}$ 、 $-1/200\text{rad}$ 、 $-1/100\text{rad}$ 、 $-1/50\text{rad}$ 、 $-1/20\text{rad}$ 、について示し、更に $-1/20\text{rad}$ の最終状況の写真を示す。

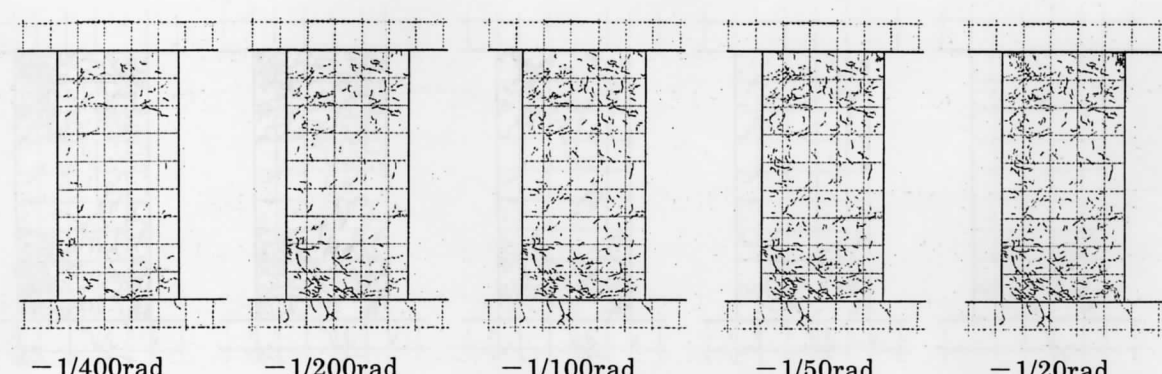
HFRCC-1A においては部材角  $1/200\text{rad}$  まではスタブ近傍を中心に主筋に沿いマイクロクラックが進展した。部材角  $1/300\text{rad}$  あたりでエネルギー吸収部材とスタブとの界面に剥離破壊が発生し、変形が進行するに従って剥離破壊が拡大していった。ひび割れは部材全体に分布していったが、部材角  $1/50\text{rad}$  付近で損傷がエネルギー吸収部材とスタブとの界面に集中し、ひび割れは進展しなかった。

HFRCC-1AA においては HFRCC-1A と同様なひび割れ進展を示したが軸力が加わっているため各部材角とも HFRCC-1A に比べひび割れ数が少なかった。

HFRCC-1B では、主筋及びX型配筋に沿うように微細ひび割れが部材全体に分布し HFRCC-1A に比べひび割れ数は増加した。平行配筋の試験体と同様、最終的には損傷が界面の剥離破壊に集中し部材角  $1/50\text{rad}$  付近になるとひび割れは進展しなかった。

HFRCC-3 では、最初にエネルギー吸収部材のハンチ部に微細ひび割れが発生し、主筋及びX型配筋に沿うように部材全体に進展した。界面の剥離破壊は部材角  $1/200\text{rad}$  あたりで発生したが、他の試験体に比べ損傷が界面の剥離破壊のみに集中せず、部材角  $1/20\text{rad}$  までひび割れの進展が確認できた。

また図-12.21 に HFRCC-1AA のスタブ部におけるひび割れ進展図を示す。部材角 $+1/200\text{rad}$  (+4 サイクル) においてエネルギー吸収部材とスタブ部の界面、危険断面においてひび割れが発生しはじめる。その後部材角 $+1/100\text{rad}$  (+8 サイクル) においては、スタブ部に生じたひび割れ幅も大きくなり、目開きをはじめ、更に左右の载荷を繰り返すことによって、損傷は増大していく。試験体を作製する際にエネルギー吸収部材の打ち継ぎ部を目荒らしし、スタブ部を打設したため、スタブ表面ではなく、スタブの内部でひび割れが増大していった。部材角 $+1/20\text{rad}$  (+16 サイクル) においては、エネルギー吸収部材を引き抜いたかのようなコーン状のひび割れがスタブ部に発生する結果となった。この傾向は HFRCC-3 以外の試験体に共通して存在し、断面形状を変化させた HFRCC-3 では、スタブ部にひび割れが発生するのが遅く、最終状況においてもスタブの損傷は他の試験体に比べて少なかった。



-1/400rad

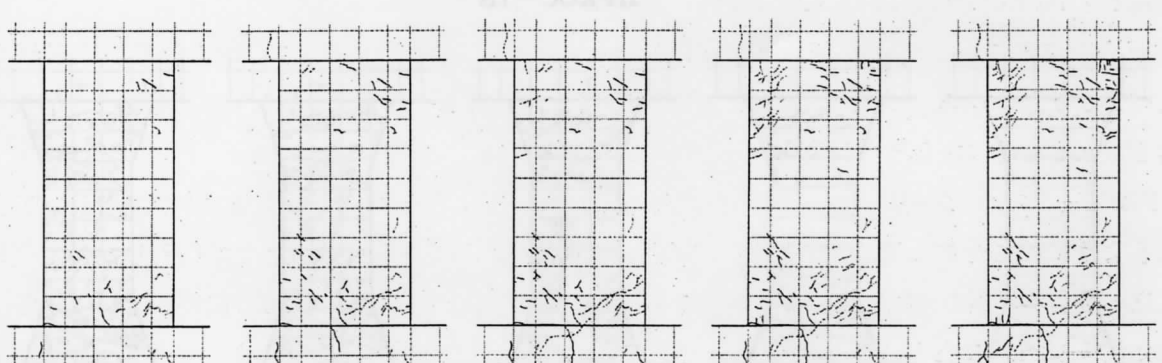
-1/200rad

-1/100rad

-1/50rad

-1/20rad

HFRCC-1A



-1/400rad

-1/200rad

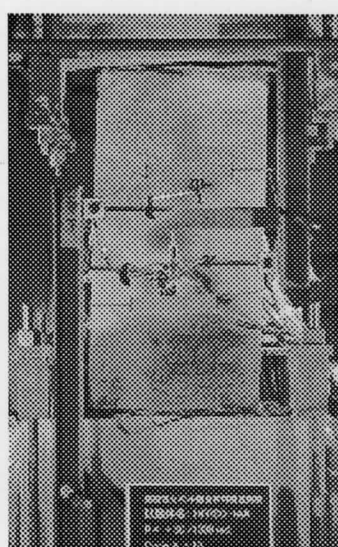
-1/100rad

-1/50rad

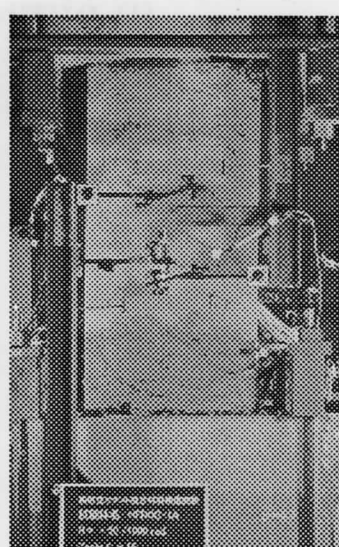
-1/20rad

HFRCC-1AA

(1) ひび割れ進展



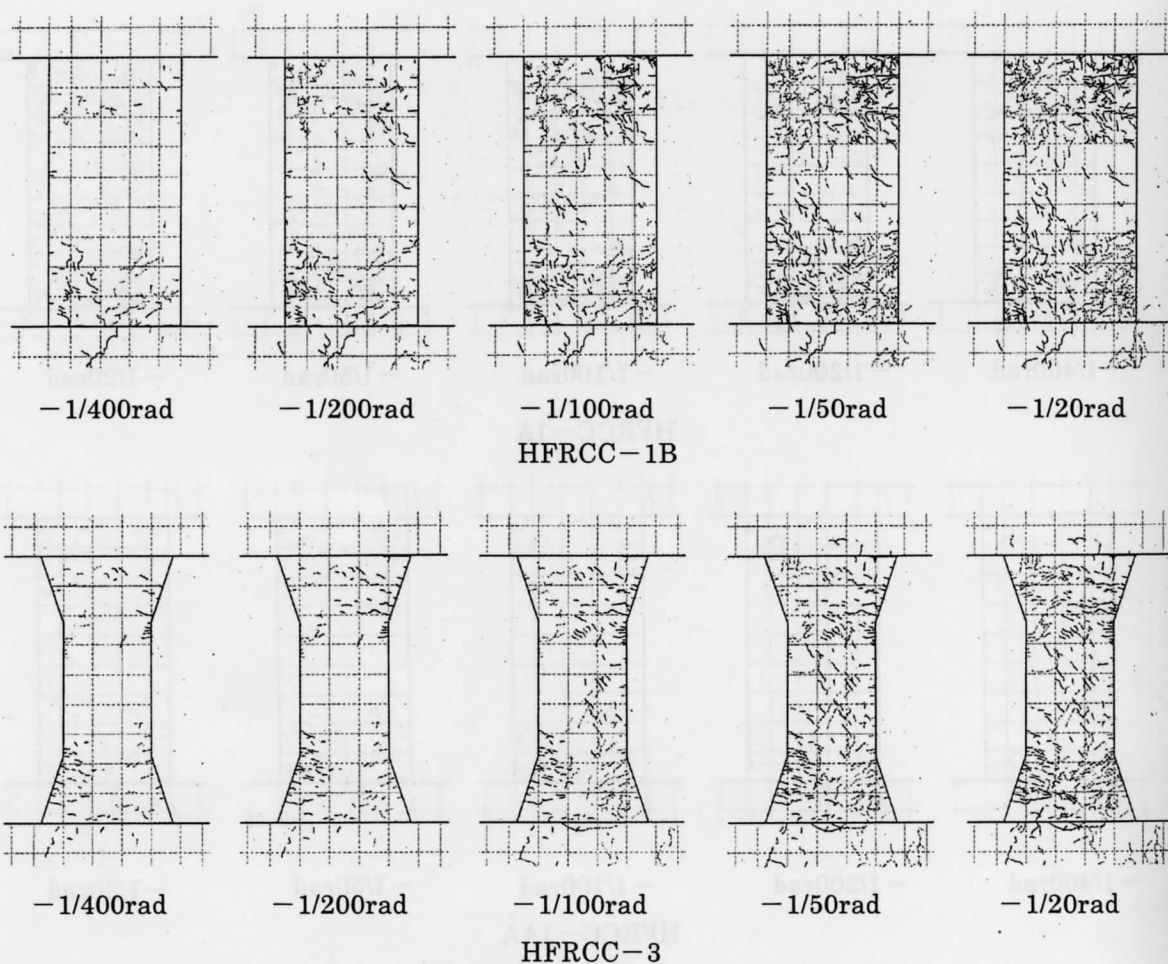
HFRCC-1A



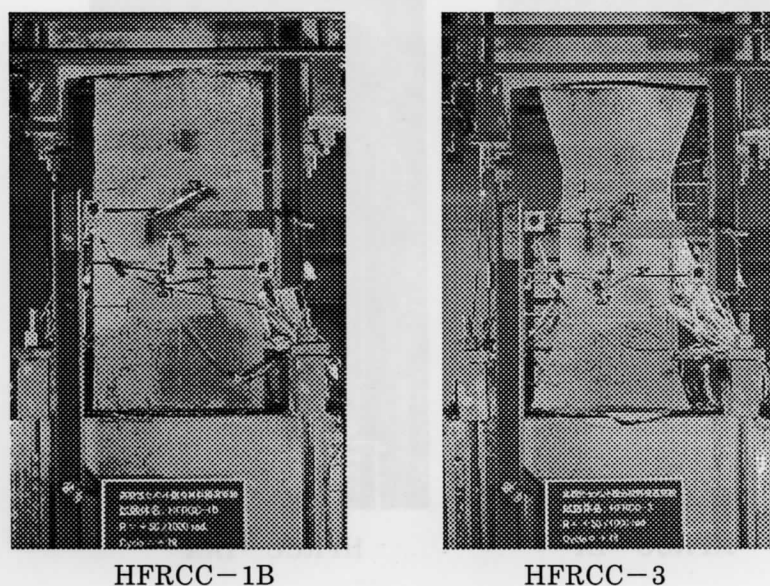
HFRCC-1AA

(2) 最終状況

図-12.20 ひび割れ進展及び最終状況



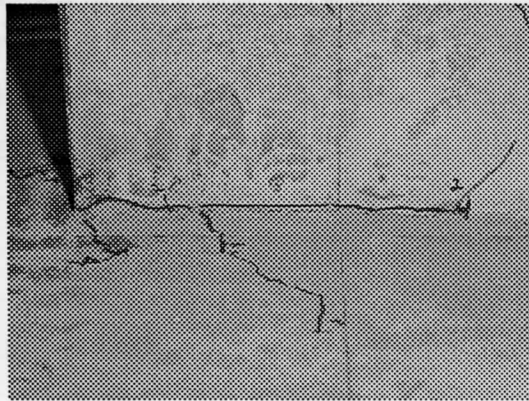
(1) ひび割れ進展



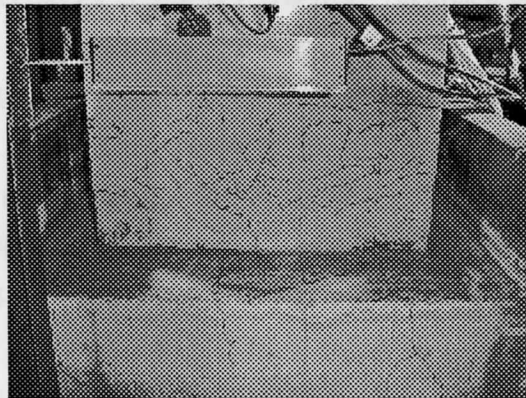
(2) 最終状況

図-12.20 ひび割れ進展及び最終状況

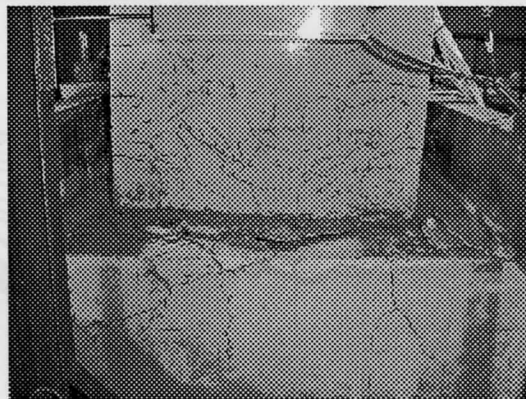




部材角+1/200



部材角+1/100



部材角+1/20

図-12.21 危険断面における損傷進展 (HFRCC-1AA)

### 12.3.6 X型配筋についての考察

図-12.22 に最もエネルギー吸収性能に優れた履歴性状を示した HFRCC-3 の履歴性状、及び HFRCC-3 の履歴ループの部材角 0 地点付近を拡大した図を示す。HFRCC-3 の履歴ループが紡錘形となった理由としては、図-12.22 中の部材角 0 点での耐力が、左右の荷重を受けるに従って徐々に増大していく挙動が確認できることにありと考えられる。この挙動は平行主筋のみを配した HFRCC-1A、HFRCC-1AA には確認できない挙動なので、X型配筋を配することにより得られた挙動であることは明らかである。そこでX型配筋のひずみについて再確認する。

図-12.23 にX型配筋のひずみを総変位、つまり荷重によってエネルギー吸収部材に与えられた変位を  $x$  軸方向に加算し、それを軸として示す。表示したひずみの測定箇所は図-1に示す測定箇所のうち、1X、2X、1Y、2Y である。初期の小さいサイクルの場合（図-12.23 の①）では、正方向（右方向）荷重時には 1X と 2X、つまり試験体正面に向かって右上から左下に向かって配した斜め筋が引張ひずみを生じ、1Y と 2Y、試験体正面に向かって左上から右下に向かって配した斜め筋が圧縮ひずみを生じている。また荷重のピークを過ぎ、部材角 0 点において引張ひずみを生じていた 1X、2X が圧縮ひずみを生じはじめ、圧縮ひずみを生じていた 1Y、2Y が引張ひずみを生じはじめる。従って部材角 0 点において鉄筋の役割が交換するということになる。荷重が進むにつれて、圧縮側鉄筋の圧縮ひずみよりも、引張側鉄筋の引張ひずみの方が比較的に大きくなるという傾向が確認できる。しかし左右の荷重を受けるに従って、部材角 0 点で行われていた圧縮側鉄筋と引張側鉄筋の役割交換が部材角 0 点前で行われるようになり、引張側鉄筋の大きく塑性化する部材角  $12.5/1000$  を過ぎるとその傾向が顕著になってくる（図-12.23 ②）。更に、引張側の鉄筋が圧縮ひずみを生じにくくなるのも確認できる（図-12.23 ③）。これは引張側鉄筋の塑性化、引き抜けにより、試験体全体が上側に引き抜かれるような状態になり、部材角 0 点、更には圧縮側においても初期状態のように、圧縮ひずみを生じないようになっていると考えられる。そ

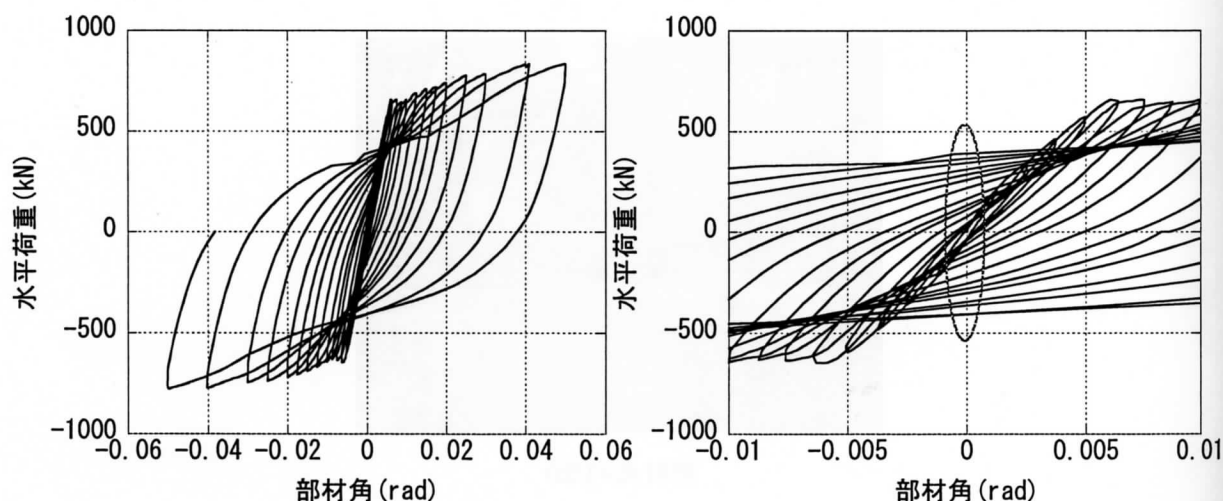


図-12.22 HFRCC-3 荷重部材角関係

れによって、初期状態では、交互に圧縮ひずみと引張ひずみを生じていたX型配筋が、お互いに、引張ひずみを生じている時間が長くなり、部材角0点においては、両方の斜め筋が引張ひずみを生じるようになる。しかし、このひずみについては、両方の斜め筋において引張ひずみを生じているが、鉄筋に残留ひずみが蓄積されることを考慮すると、引張ひずみが大きく降伏ひずみを超えたのちでは、早い段階から圧縮力を負担していることが示唆される。つまり、残留ひずみの蓄積が、徐荷時の圧縮耐力を早期に発揮させ、再載荷時に更に残留ひずみを蓄積させることにより、更に早い段階の圧縮耐力の得られ、部材角0点での耐力が最大変形の増大と共に、上昇していくと考えられる。よってX型配筋をより有効に働かせることが、より大きな紡錘形の履歴曲線を得る為には必要であり、そのためには変形を的確にX型配筋のひずみに変換する必要があると考えられる。HFRCC-3のような部材断面の変化は部材端部の損傷を防ぎ、鉄筋の引き抜きを抑制するのに効果的であり、X型配筋に効率よくひずみを伝達するのに効果的であると考えられ、この点でも断面形状の変化が効果的であると考えられる。

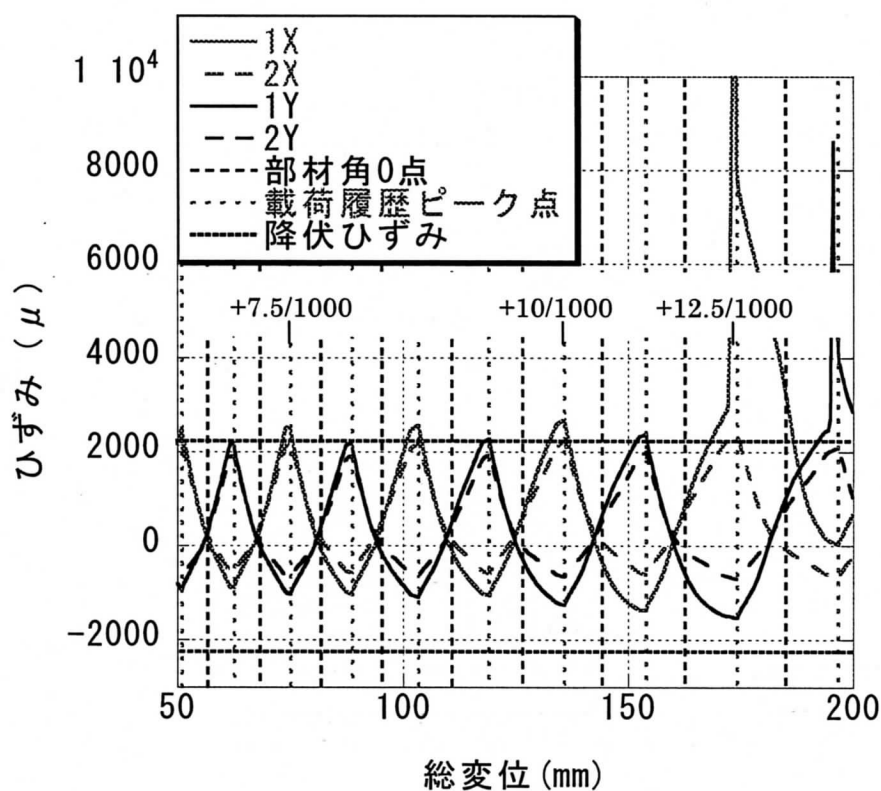
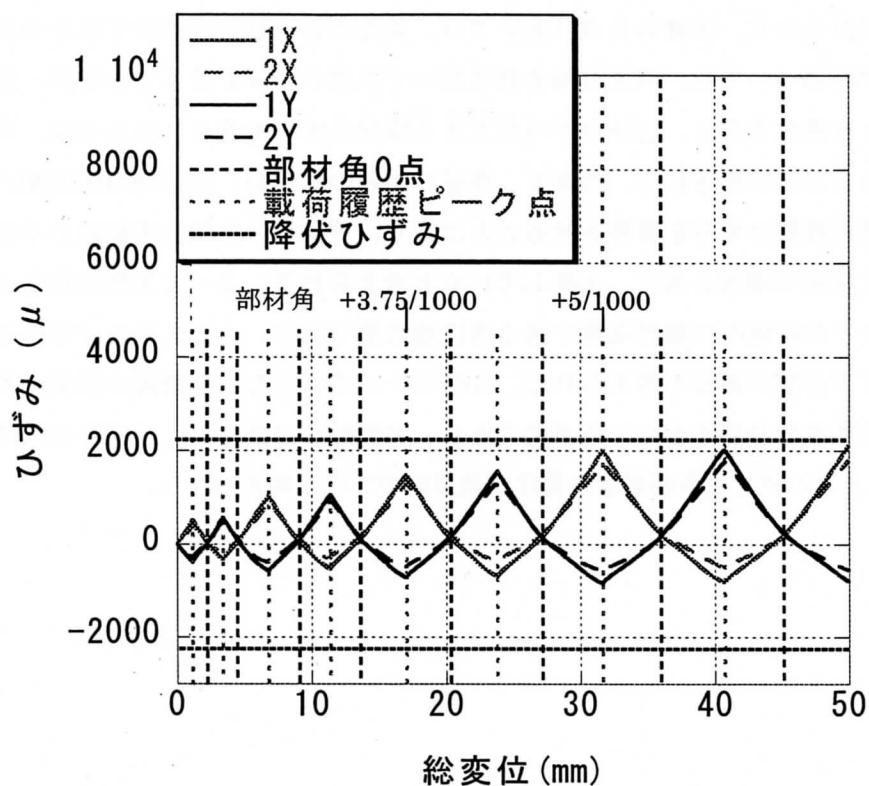
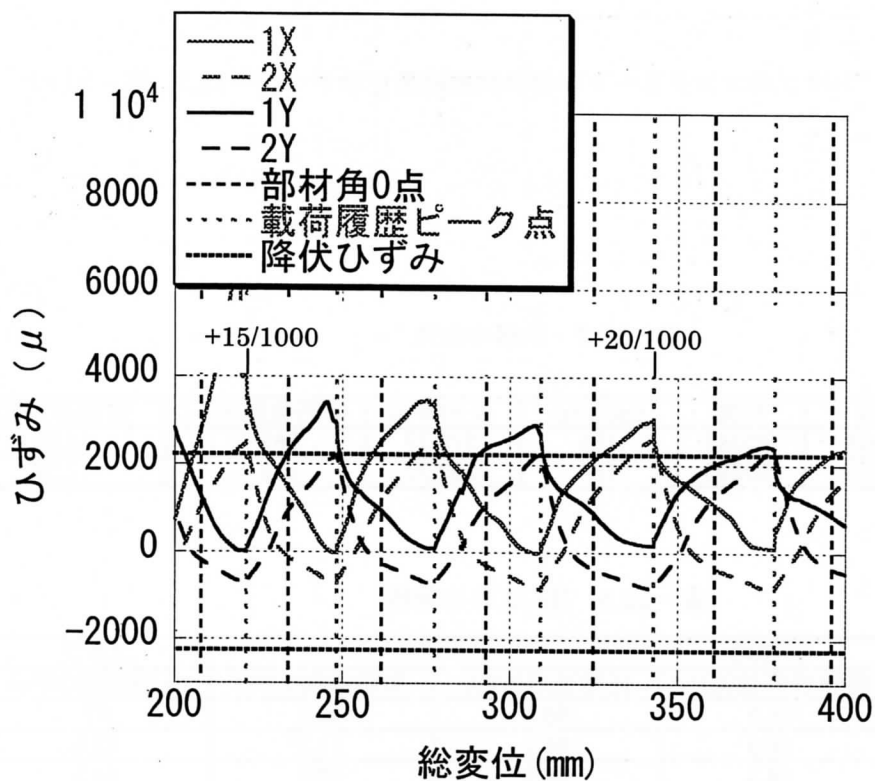
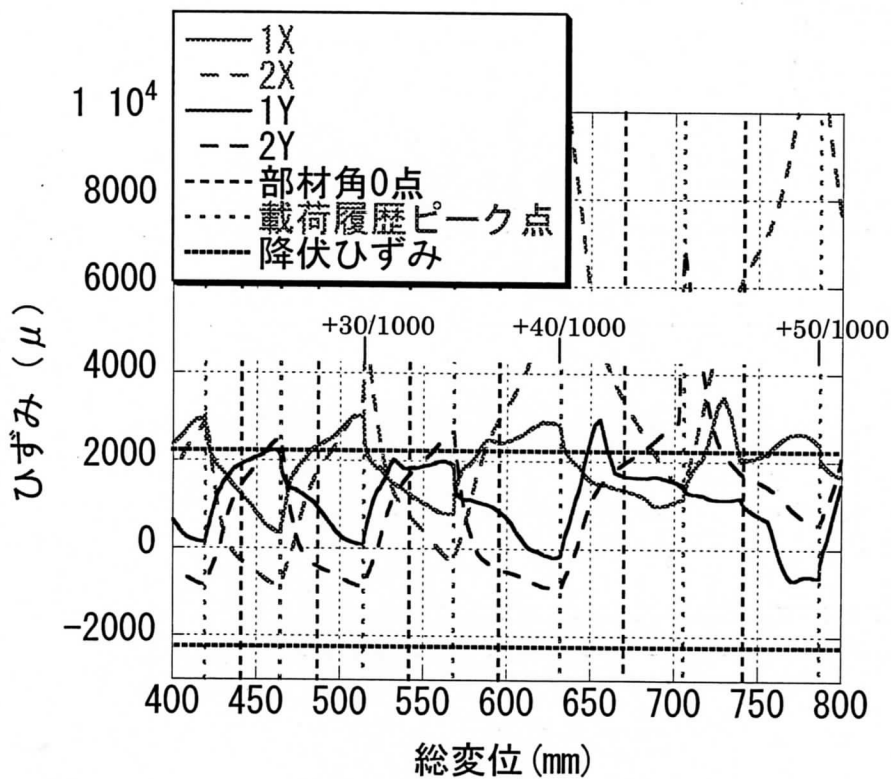


図-12.23 X型配筋ひずみ



③ 総変位 200~400mm



④ 総変位 400~800mm

図-12.23 X型配筋ひずみ

### 12.3.7 材料試験結果

最後に鉄筋と HFRCC、スタブのコンクリートの材料試験結果を示す（表－12.7、表－12.8）。

表－12.7 鉄筋の物性

	径	材質	$E_s(\text{GPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	破断強度(MPa)	破断伸び(%)
主筋	D19	SD345	185	378.77	562.77	14.99
せん断補強筋	D10	SD295	184	382.77	522.45	17.09

表－12.8 HFRCC の物性

	HFRCC			スタブ
	静弾性係数(GPa)	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	圧縮強度(MPa)
HFRCC－1A	18.2	65.6	13.2	67
HFRCC－1AA	18.3	59.2	11.3	63.5
HFRCC－1B	18.3	66.6	10.6	74.5
HFRCC－3	18.2	70.3	12.8	74.5



第 13 章 数値解析的検証及び応用展開

13.1 はじめに

ここでは、非線形有限要素プログラム(ATENA)を用いて、第 12 章で行った HFRCC を用いたエネルギー吸収部材の構造実験を検証し、エネルギー吸収部材の更なる高性能化を目指して応用展開する。目的としては、実験を解析により評価し、更にエネルギー吸収性能に優れた部材を開発するためのステップとする。

13.2 解析の妥当性の検討

13.2.1 解析概要

解析モデルは第 12 章の構造実験により最も良い性能を示したと考えられる HFRCC-3 を用い、それをベースとする。HFRCC-3 の配筋図は第 12 章の図-12.1 に示す通りである。

HFRCC の材料モデルは構造実験と同時に行った材料実験に基づき決定した。圧縮の構成則については円柱試験体の圧縮試験から、また引張構成則については角柱の 3 点曲げ試験による曲げ荷重-CMOD 曲線から引張軟化曲線を算出し、その引張軟化曲線に基づき、ポストピークをリニア型にモデル化した(図-13.1)。鉄筋の材料モデルについても構造試験と同時に行った材料実験に基づき決定した。HFRCC とスタブに用いたコンクリートの材料物性を表-13.1 に、鉄筋の材料物性を表-13.2 に示す。

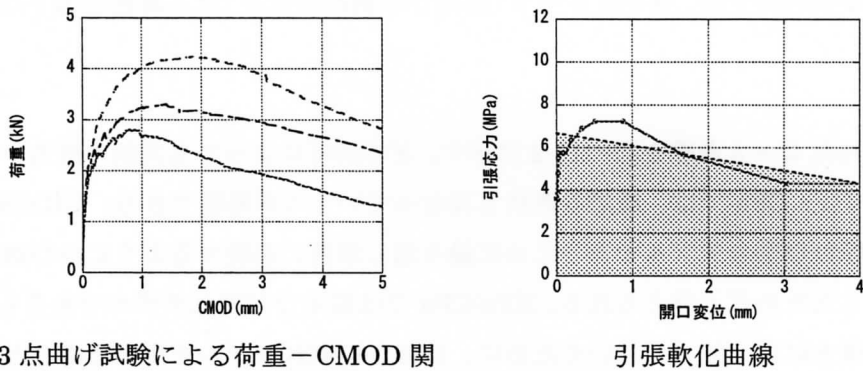


図-13.1 HFRCC のモデル化

表-13.1 HFRCC の物性

	$E_0(\text{GPa})$	$f'_c(\text{MPa})$	$f_t(\text{MPa})$	$\varepsilon_{co}$	$c_1$	$c_2$	$G_F(\text{N/mm})$
HFRCC	18.2	70.3	6.68	0.007725	1.0	0.650	22.057
コンクリート	41.1	74.5	7.45	0.003625	—	—	0.1

表－13.2 鉄筋の物性

	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$sh$ (GPa)
D19(主筋)	378.8	185	3.7
D10(帯筋)	382.8	184	3.68

### 13.2.2 ひび割れモデルによる検討

まず、ひび割れモデルを変化させることによって検討する。ATENA には、回転ひび割れモデルと固定ひび割れモデルの2つのひび割れモデルから、ひび割れモデルを選択することができる。この2つのひび割れモデルは、ひび割れ発生後にせん断力が発生するかどうかということに大きな違いがある。固定ひび割れモデルの場合、ひび割れ発生後、ひび割れ面にせん断力が発生する。ひび割れ幅の増大に伴い、せん断剛性は減少していくのだが、今回の実験では、スタブの断面積が、エネルギー吸収部材部に比べて大きいこと、また、スタブがせん断補強筋により頑強に補強されていることから、ひび割れが増大してもせん断剛性が減少しないと仮定しても妥当であると考えられる。よってここでは、回転ひび割れモデル、固定ひび割れモデル、そしてせん断剛性維持係数をパラメーターとし、検討を行う。解析を行うシリーズは以下に示す通りである。

1. HFRCC・コンクリート両方とも回転ひび割れモデル；HR:CR
2. HFRCC・コンクリート両方とも固定ひび割れモデル（せん断剛性低下考慮）；HFa:CFa
3. HFRCC・コンクリート両方とも固定ひび割れモデル（せん断剛性低下なし）；HFb:CFb
4. HFRCC：回転ひび割れモデル、コンクリート：固定ひび割れモデル（せん断剛性低下考慮）；HR:CFa
5. HFRCC：回転ひび割れモデル、コンクリート：固定ひび割れモデル（せん断剛性低下なし）；HR:CFb

解析によって得られた  $Q-\delta$  曲線を図－13.2 に示す。どの解析によっても実験の耐力を大きく下回った。また HR:CR と HFa:CFa では、履歴の形状も異なっているのが確認できる。HR:CR については、ひび割れモデルが回転ひび割れモデルであるために繰り返し載荷に追従するようにひび割れが回転し、その間も耐力を維持したためだと考えられる。HFa:CFa では固定ひび割れモデルであるものの、せん断剛性がひび割れ幅の増大に従い減少していくために、回転ひび割れモデルを用いた場合と同程度しか評価できなかったと考えられる。HFb:CFb、HR:CFa、HR:CFb では耐力は下回るものの、履歴性状は実験に近づいた。特に HFb:CFb は耐力も比較的实验値に近づき、ここで行った解析のうちでは最も良く実験を評価できていると考えられる。軸方向変位（図－13.3）を見ると、こちらでは回転ひび割れのほうが比較的实验値を評価できているのが確認でき、固定ひび割れモデルの場合では、除荷時における軸方向変位の戻りが大きいのが確認できる。回転ひび割れモデルでは、要素に発生したひび割れが回転することにより、軸方向変位を擬似的に評価したと考えられる。固定ひび割れモデルでは、鉄筋の付着性能が完全付着であるため、鉄筋の引き抜き挙動をうまく評価できず、また今回の実験で顕著となったス

タブの剥離破壊が、解析上では離間を考慮しなかったため軸方向変位に大きな違いが発生したものと考えられる。いずれにしても軸方向変位が荷重－水平変位関係と相関が高いことが確認できる。解析で繰り返し載荷を考慮する場合、回転ひび割れモデルだとひび割れが回転してしまい、引張りによるひび割れが発生した後に、逆方向の載荷により圧縮がかかると、ひび割れが圧縮力と垂直の方向に向いてしまい、実験とは異なる挙動となってしまう。また、様々な解析を行った印象としては、回転ひび割れモデルでは、セメント系材料の繰り返し挙動を過大評価してしまう傾向がある。HFRCC の繰り返し載荷挙動は実験では検討を行っていないが、一般的に引張によりひび割れを発生させた後ではそのひび割れが閉じるまで圧縮力を維持できないとされており、一度ひび割れを発生させた後、もう一度引張力をかけた場合では、一度発生させたひび割れ幅に達するまでは引張力を維持できず、そのひび割れ幅に達した後に引張力を維持できるとされている。従って、回転ひび割れモデルでは、HFRCC を HFRCC に設定された引張強度を持つ、鋼材のような挙動を解析上では示してしまい、実挙動とは異なる繰り返し載荷挙動を示してしまうと考えられる。固定ひび割れモデルでは、セメント系材料の特徴は、実際の実験挙動と似ており、鉄筋の特徴が履歴性状に表れる印象がある。実験の結果を確認してみても、セメント系材料の特徴はそれほど顕著に表れず、鉄筋の特徴、また X 型配筋の特徴が顕著に履歴性状に表れた結果だと考えられるため、固定ひび割れモデルで解析を行った方が履歴性状についてはより実験に近い挙動を再現できると考えられる。

図－13.4 にひび割れ状況とマトリクスのひずみ分布をしめす。こちらの結果では変形性状及び損傷についても、スタブに大きな損傷を示した HR:CR の方が実験を精度良く評価できたと考えられる。

これらの結果から、損傷状況、軸変位については、回転ひび割れモデルを用いたほうが実挙動を精度良く評価できると考えられるが、荷重－変位関係については固定ひび割れモデルを用いたほうが精度良く評価できた。今後の検討ではこれらのひび割れモデルを組み合わせ検討していく必要があると考えられる。以下の検討では履歴性状に着目するため、すべてに固定ひび割れを採用し、せん断剛性の低下を無視して検討を行う。

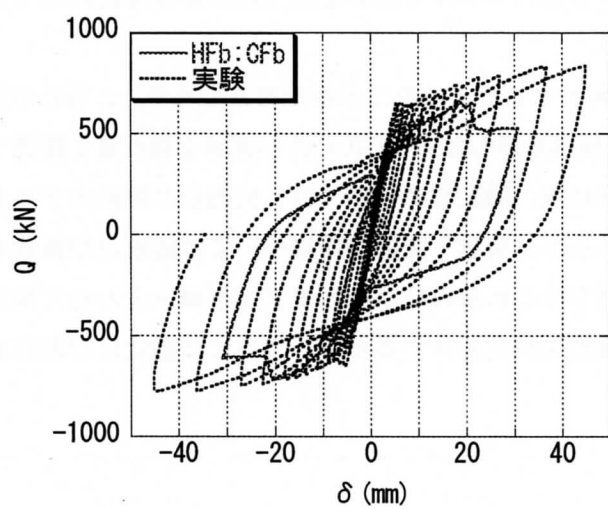
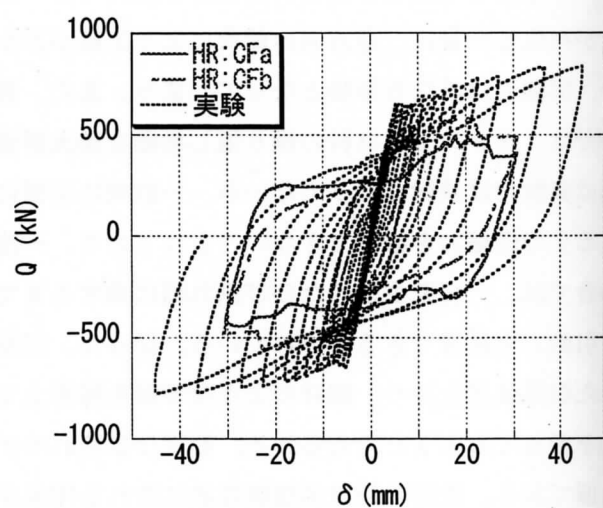
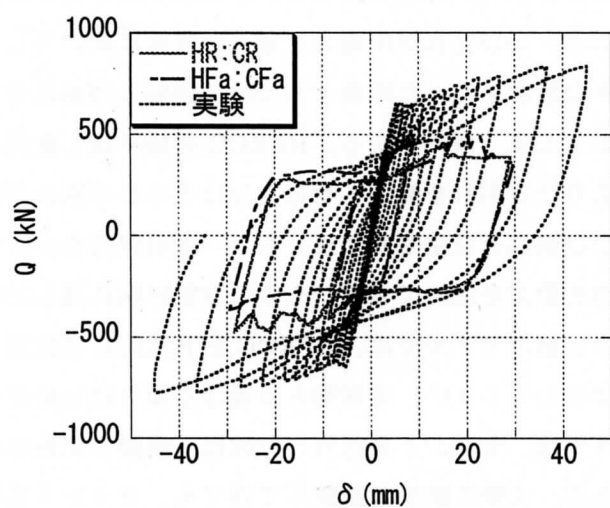


図-13.2  $Q-\delta$  曲線

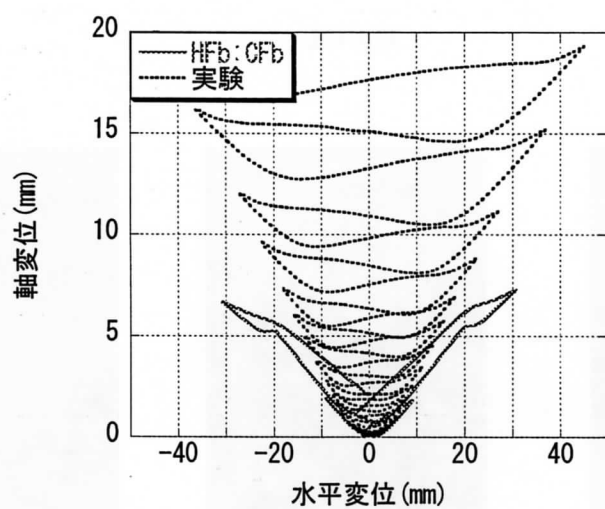
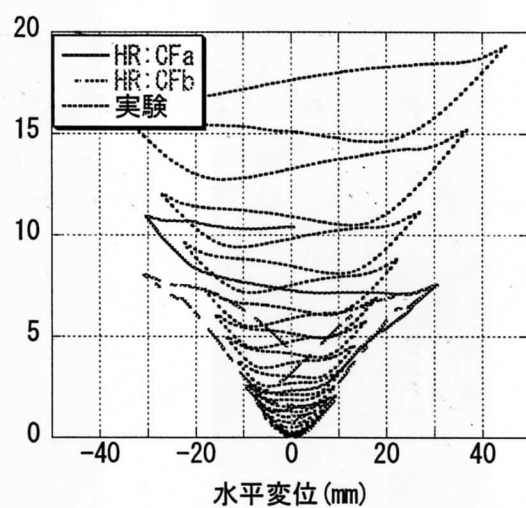
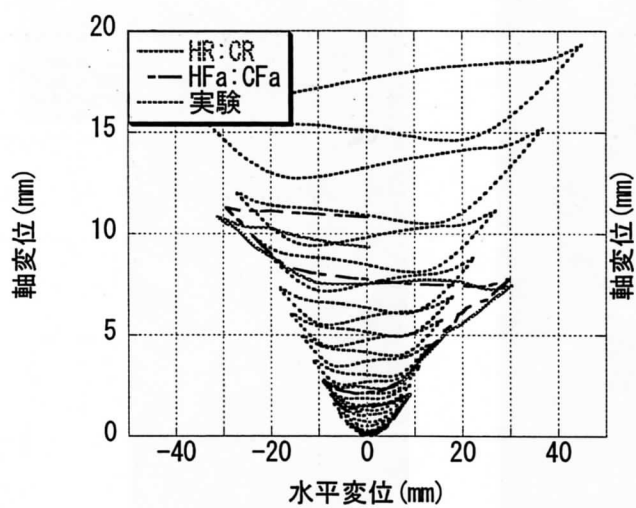
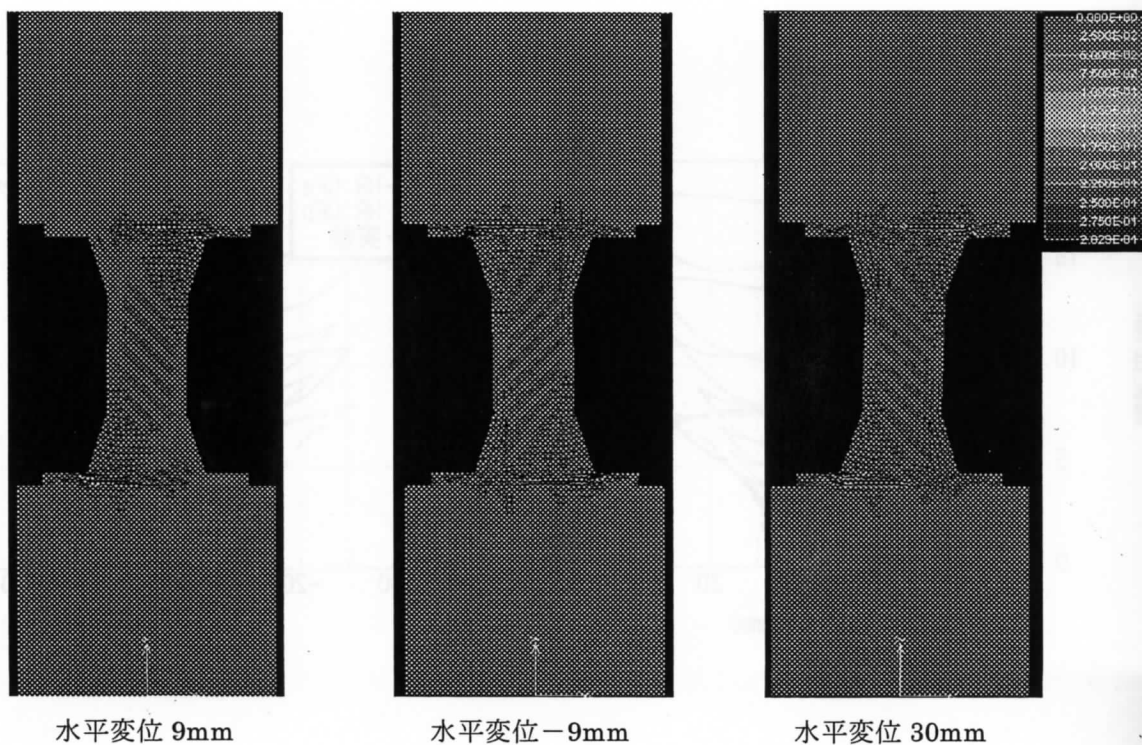
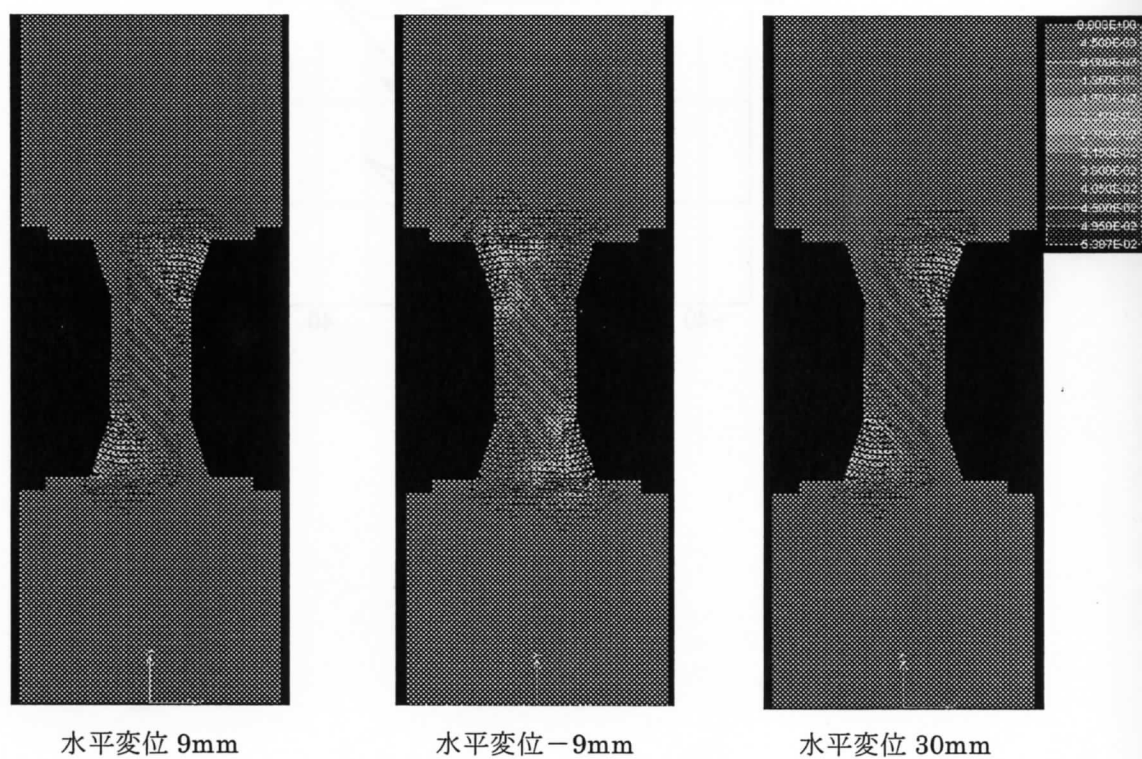


図-13.3 軸変位



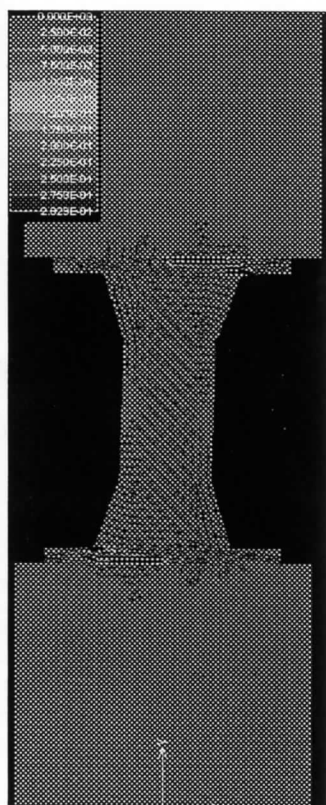
HR:CR



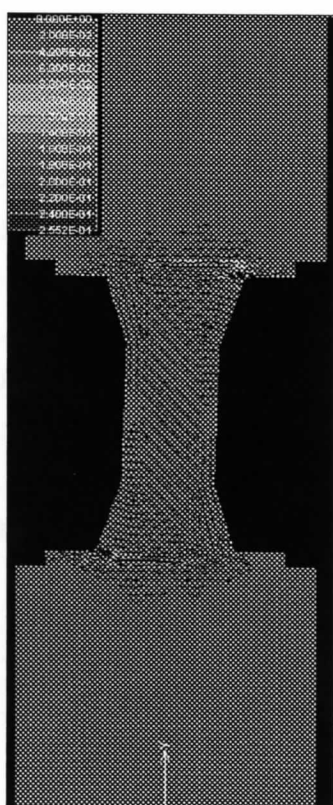
HFb:CFb

图-13.4 损伤状况

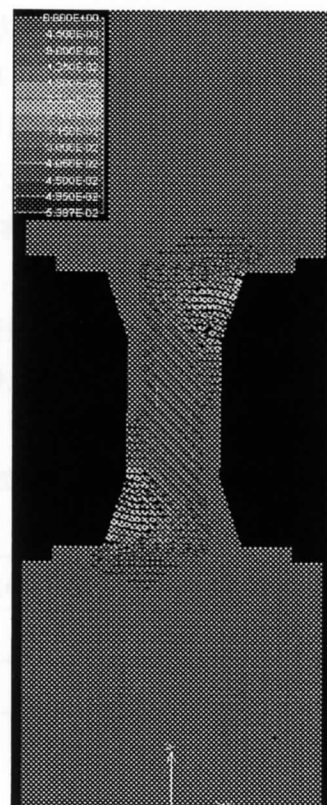




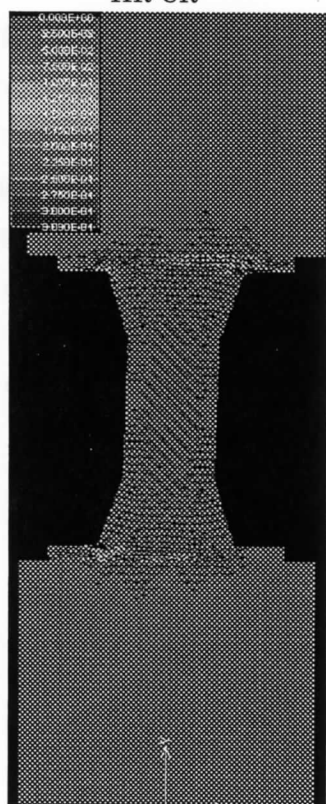
HR:CR



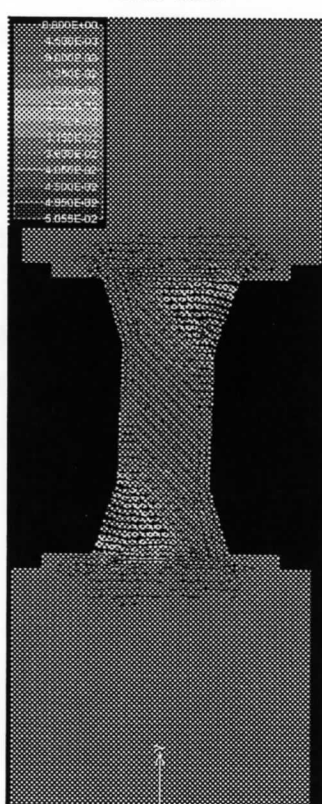
HR:CFa



HFb:CFb



HFa:CFa



HR:CFb

図-13.5 水平変位 30mm での損傷状況

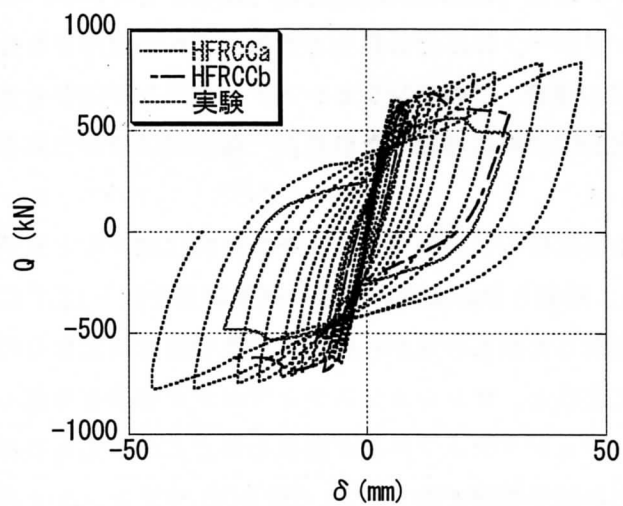
### 13.2.3 HFRCC の引張耐力による検討

これまでの検討により、HFRCC の物性のうち、ポストピークにおける引張耐力が履歴性状に最も大きな影響を及ぼすことを明らかにした。ポストピークの引張耐力が向上することによって、エネルギー吸収部材の最大耐力が向上するということがわかっている。ここでは HFRCC の引張耐力を変化させることにより、解析により実験をどの程度評価できるか検討する。ここまでは、引張軟化曲線をもとに HFRCC の引張強度とポストピーク挙動をモデル化し解析を行ってきたが、実験と同時に行った割裂引張試験より導き出した引張強度と大きく異なるのが確認できる。これをもとに HFRCC のポストピーク挙動をパラメーターとし比較検討する。ここで比較する HFRCC の材料物性を表-13.3 に示す。引張軟化により決定した HFRCC の物性を HFRCCa、割裂引張試験より決定した HFRCC の物性を HFRCCb とする。軟化領域での耐力低下係数  $c_1$ 、 $c_2$  は変化させず行うため、 $G_F$  も引張強度に比例して向上させる。

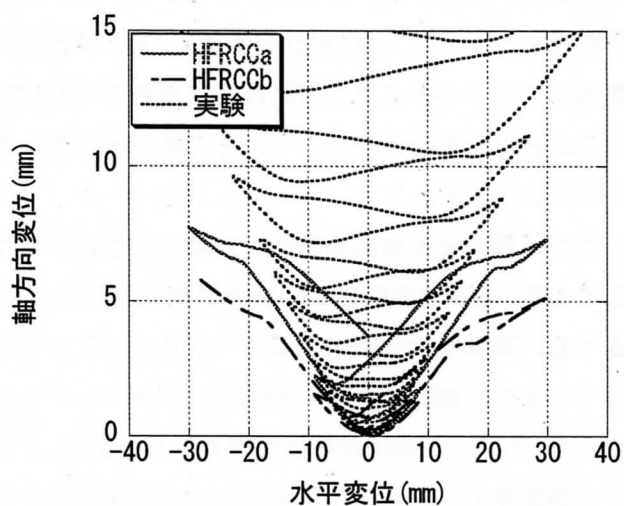
表-13.3 HFRCC の物性変化

	$E_d(\text{GPa})$	$f'_c(\text{MPa})$	$f_t(\text{MPa})$	$\varepsilon_{co}$	$c_1$	$c_2$	$G_F(\text{N/mm})$
HFRCCa	18.2	70.3	6.68	0.007725	1.0	0.650	22.057
HFRCCb	18.2	70.3	12.8	0.007725	1.0	0.650	42.238

解析により得られた  $Q-\delta$  曲線、及び水平変位-軸方向変位関係を図-13.6 に示す。図-13.6①から、HFRCCa に比べ HFRCCb の最大耐力は向上し、実験値をほぼ評価できているものの、繰返し載荷を受け部材角 0 点に戻ってきた時の耐力が向上していないのが確認できる。ここで行った 2 つの解析では、HFRCCb の方が引張耐力を向上させているにも関わらず、変位 0 点での耐力が向上しないのは、軸方向変位が HFRCCa に比べて小さくなっているためと考えられる (図-13.6②)。また水平変位-軸方向変位関係から、おおむね傾向としては、実験値と解析値が似ているものの、軸方向変位についても、実験値を解析で評価しきれていないのが確認できる。実験値に比べ、解析値は、除荷から再載荷へ向かって軸方向変位が大きく戻るのが大きな違いである。これらの結果を踏まえ、HFRCC の物性としては、引張軟化曲線に基づき決定した HFRCCa の物性を用いることとする。また軸方向変位を実験値により近づけるために、今までの解析では導入していた自重を無視することとする。



①  $Q-\delta$  曲線



② 水平変位－軸方向変位関係

図-13.6 HFRCC の引張耐力による検討

#### 13.2.4 テンションスティフニング効果を考慮した鉄筋の物性変化による検討

RC 部材のひび割れ発生後の剛性が、コンクリートの引張を完全に無視した場合の剛性より大きくなる現象は、コンクリートのテンションスティフニング効果 (tension stiffening effect) と呼ばれ、これを再現するために、ひび割れ発生後も、見かけ上コンクリートに応力分担をさせるモデルが使用される。普通コンクリートよりも引張性能に優れる HFRCC の場合、このテンションスティフニング効果を無視することはできない。そこで、第 7 章で示された HFRCC 中に埋設した鉄筋の一軸引張試験の結果を用いることにする。

この実験は主に鉄筋周囲のひび割れを検出するために行った実験であり、そのために様々な工夫が施してある。図-7.2.5 に示された試験結果の中から、対象となる条件の場合の試験結果を図-13.7 に再掲する。裸鉄筋の引張応力に比べ、HFRCC 中に埋設した鉄筋の見かけの剛性、及び耐力は大きく向上しているのが確認できる。ATENA のマニュアルによると、テンションスティフニング効果を考慮しなくとも、セメント系材料中に埋設された鉄筋は、テンションスティフニング効果を示すと示してあるが、どの程度のテンションスティフニング効果を示すのかが不明瞭であること、HFRCC のテンションスティフニング効果が明らかに無視することはできないほど大きいことを考慮し、テンションスティフニングを考慮した解析を行うことにより、解析の妥当性を検討する。一般的にはテンションスティフニング効果の発生する領域に対して、テンションスティフニング効果を考慮した材料を用いることにより解析を行うが、本研究では鉄筋の物性を変化させることによりテンションスティフニング効果を評価する。

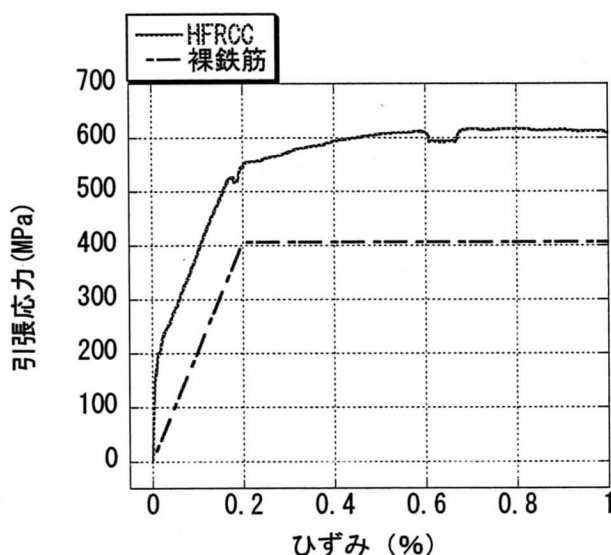


図-13.7 引張応力-ひずみ関係

図-13.7 から降伏点において応力の向上する割合を算出する。鉄筋の降伏点において、裸鉄筋の強度は 406.8MPa であるのに対し HFRCC 中に埋設した鉄筋の見かけの強度は 548.7MPa となっている。従って、その割合は約 1.35 倍となる。これに基づき鉄筋の物性を決定する。この値は鉄筋にテンションスティフニング効果を生じさせる HFRCC の領域が部材断面である 70×140mm に限られており、必ずしも正確な値とは評価しがたいが、擬似的にテンションスティフニング効果を考慮するためにこの値を採用する。表-13.4 にここで検討する鉄筋の物性の变化を示す。鉄筋の物性を材料試験結果から得られたデータに基づき算出した Bar1.0、及び鉄筋の強度・剛性を 1.35 倍とした Bar1.35 について検討を行う。

表-13.4 鉄筋の物性変化

	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$s_h$ (GPa)
Bar1	378.8	185	3.7
Bar1.35	511.4	249.8	3.7

解析結果を図-13.8 に示す。鉄筋強度を向上させることにより、解析値が実験値に近づいた。Bar1.35 では、若干耐力は低いものの履歴性状として実験値を評価できたと考える。HFRCC-3 では、鉄筋強度・剛性を 1.35 倍としたほうが実験値を的確に評価できることが確認できた。また解析では水平変位 20mm 程度から耐力が低下してしまうのを考慮して、以下の検討では水平変位 20mm 以下で解析を行い、検討を行っていく。

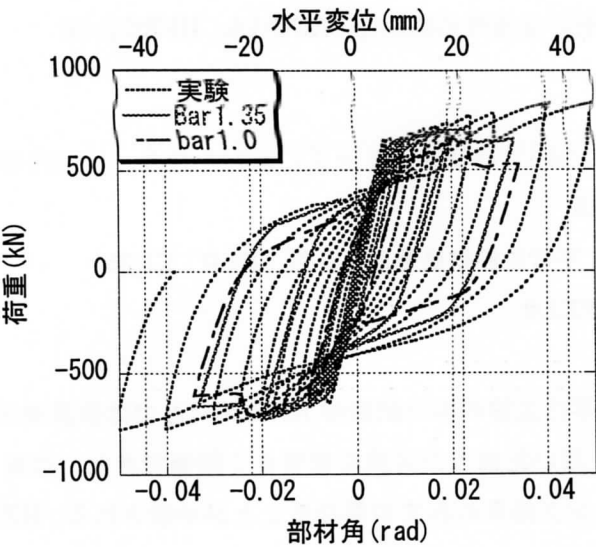


図-13.8 鉄筋強度による影響

### 13.2.5 HFRCC-1A、HFRCC-1B についての解析の妥当性

HFRCC-3 についてはほぼ解析の妥当性が得られた。ここでは他の試験体 HFRCC-1A、HFRCC-1B について解析の妥当性を検討する。まず HFRCC-3 で解析の妥当性が得られた条件と同様の条件下で解析を行った。つまり、主筋の強度と剛性を 1.35 倍とし、ひび割れモデルは固定ひび割れモデル、ひび割れ発生後のせん断剛性の低下を無視するという条件である。その解析結果を図-13.9 に示す。いずれの解析結果も実験値に対して最大耐力を過大評価しているのが確認できる。一方、除荷時の履歴曲線の特徴についてはおおむね解析結果が妥当であると考えられる。負方向載荷時の耐力が正方向載荷時の耐力よりも大きくなっているのは、ひび割れモデルが固定ひび割れモデルであるため、ひび割れ方向の固定による影響であると考えられる。

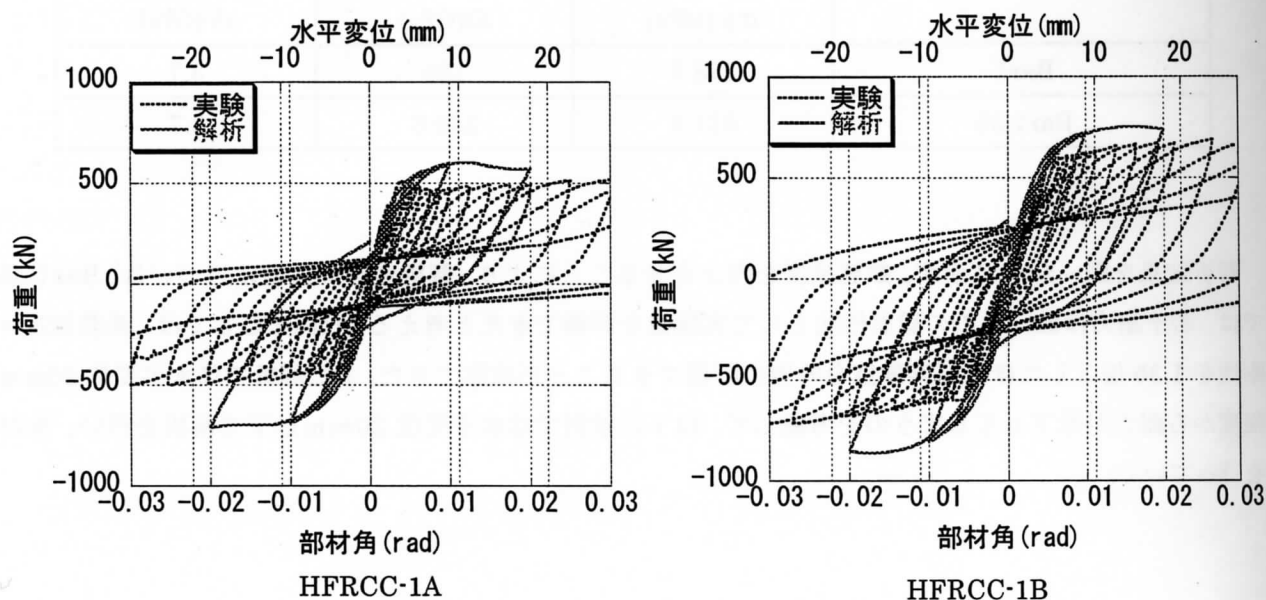


図-13.9 解析の妥当性の検討(HFRCC-1A、HFRCC-1B)

この結果を踏まえ、鉄筋強度についてパラメトリックに検討を行う。検討内容を以下に示す。①鉄筋強度・剛性すべて 1.35 倍 ; PX1.35

② X型配筋鉄筋強度剛性 1.35 倍、平行主筋鉄筋強度 1.0 倍 ; P1.0 : X1.35

③ すべて鉄筋強度・剛性 1.0 倍 ; PX1.0

解析結果を図-13.10 に示す。平行主筋のみの試験体 HFRCC-1A では鉄筋強度 1.0 倍、つまり材料試験結果から得られた鉄筋の物性を用いたほうが実験を精度良く評価できた。つまり、平行主筋と、X型配筋では、テンションスティフニング効果の程度が異なることが示唆される。HFRCC-1B においては①では解析値が過大評価となり、②③ではどちらもおおむね実験値を評価できているのが確認できる。それに対し HFRCC-3 では、③では解析値が過小評価となり、①②において実験値をおおむね評価できて



いるのが確認できる。これらの結果から考えられることは、まず、X型配筋と平行主筋では、X型配筋の変形性状が主に、軸方向の変形であるのに対し、平行主筋の変形性状は主に曲げ変形であることから、テンションスティフニング効果の程度は同一ではなく、X型配筋のほうがテンションスティフニング効果の程度が大きいこと、また、HFRCC-3 では部材断面形状を変化させていることにより、X型配筋が均一に歪んだため、X型配筋のテンションスティフニング効果を顕著に得ることができたが、部材断面形状を変化させなかった HFRCC-1B ではX型配筋のひずみが部材端部に集中したため、テンションスティフニング効果が顕著に表れなかったことが示唆されることである。HFRCC-3 がエネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状が得られた要因の一つとして、断面形状を変化させることでX型配筋のテンションスティフニング効果が顕著に表れた結果であるということが考えられる。

しかし、今回はテンションスティフニング効果について鉄筋強度を向上させるという形で評価したが、忠実に再現するためには、鉄筋のひずみ状態に応じて忠実に評価されるべきである。また、今回は、鉄筋強度・剛性を 1.35 としたわけであるが、この値についても、テンションスティフニング効果を考慮するための的確な値ではなく、テンションスティフニング効果の生じる領域について検討を進めた上で、評価するべきである。これらを踏まえた上で、以下の検討では履歴性状に着目するため、解析条件の統一、簡便化を考慮し、平行主筋の主筋強度・剛性については材料試験結果をもとに決定した材料物性を採用し、X型配筋の鉄筋強度・剛性についてはテンションスティフニング効果を考慮し 1.35 倍とした物性を用いることとする。

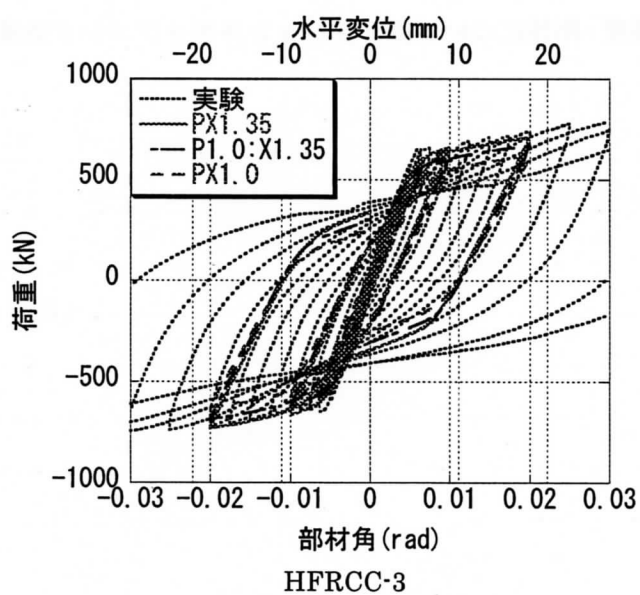
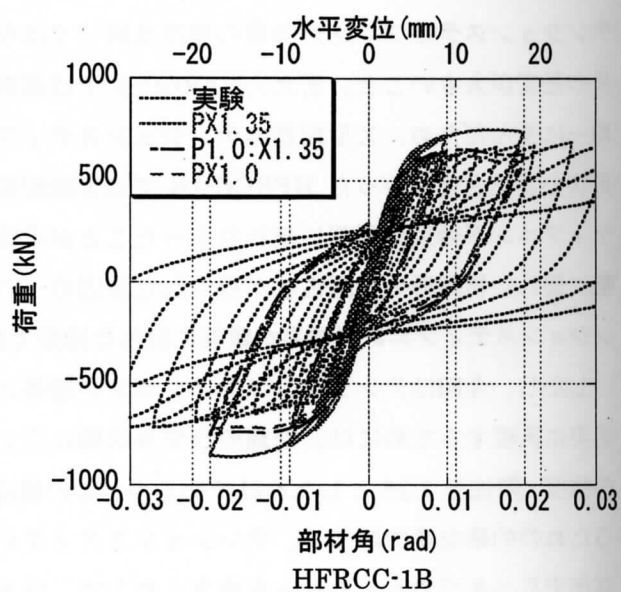
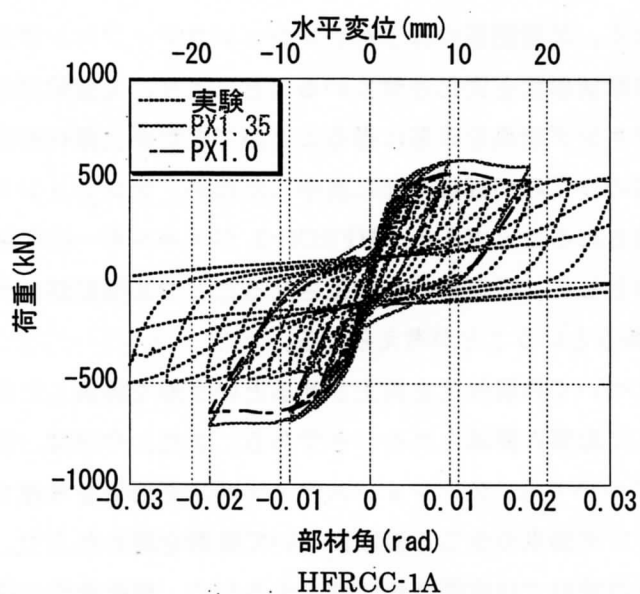


図-13.10 鉄筋強度による影響

13.3 実験の検証及び応用展開

13.3.1 はじめに

ここでは、実験の結果を参考に考察を深める。実験により、HFRCC-3 のような紡錘形の履歴曲線が得られたメカニズムについて、解析により検討し、更に大きな紡錘形の履歴曲線を得るためにはどうすればいいのか検討する。

13.3.2 解析概要

解析の概要としては、13.2 で検討した解析の妥当性に基づき、妥当性を得られたモデルをベースとする。ここで再び概説する。

セメント系材料の物性を表－13.5 に示し、鉄筋の物性を表－13.6 に示す。HFRCC の物性については、材料試験と引張軟化曲線に基づき決定し、鉄筋の物性については、材料試験によって得られたデータをもとに、テンションスティフニング効果を考慮し、X型配筋のみ、剛性、強度を 1.35 倍とし、平行主筋については材料試験結果によって得られた材料物性とした。ひび割れモデルは固定ひび割れモデルを採用し、ひび割れ発生後、ひび割れ面に垂直な方向に増大するひずみに伴うせん断剛性の低下を無視した。

表－13.5 セメント系材料の物性

	$E_0(\text{GPa})$	$f'_c(\text{MPa})$	$f_t(\text{MPa})$	$\epsilon_{co}$	$c_1$	$c_2$	$G_F(\text{N/mm})$
HFRCC	18.2	70.3	6.68	0.007725	1.0	0.650	22.057
コンクリート	41.1	74.5	7.45	0.003625	—	—	0.1

表－13.6 鉄筋の物性

	$\sigma_y(\text{MPa})$	$E_s(\text{GPa})$	$sh'(\text{GPa})$
D19(平行主筋)	378.8	185	3.7
D19(X型主筋)	511.4	249.8	3.7
D10(帯筋)	382.8	184	3.68

### 13.3.3 形状についての検討

ここで、実験における、HFRCC-1B と HFRCC-3 の間で異なる、X 型配筋量、及び、形状について、どちらの要因で HFRCC-3 が示したようなエネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状が得られたのかを検討する。

HFRCC-1B の X 型配筋量を 2 倍、つまり HFRCC-3 の X 型配筋量と一致させて解析を行う。13.2.4 の検討により、HFRCC-1B の場合 X 型配筋について、テンションスティフニング効果を考慮して X 型配筋強度を 1.35 倍としなくても解析の妥当性が得られたことから、X 型配筋の鉄筋強度を、平行主筋の強度の 1.35 倍としたものと、X 型配筋の鉄筋強度を平行主筋の強度と同じ強度としたものの 2 種類について検討を行う。前者を HFRCC-1B-2X-a とし後者を HFRCC-1B-2X-b とする。

解析結果を図-13.11 に示す。どちらの場合についても HFRCC-1B の方が大きい最大耐力を示すことが確認できる。これは配筋方法の違い、つまり HFRCC-3 に比べ HFRCC-1B の主筋が外側に配置されているためであると考えられる。剛性については HFRCC-3 の方が小さく、部材角 0 点での耐力はほぼ一致し、またエネルギー吸収性能についてはほとんど変化がないと考えられる。

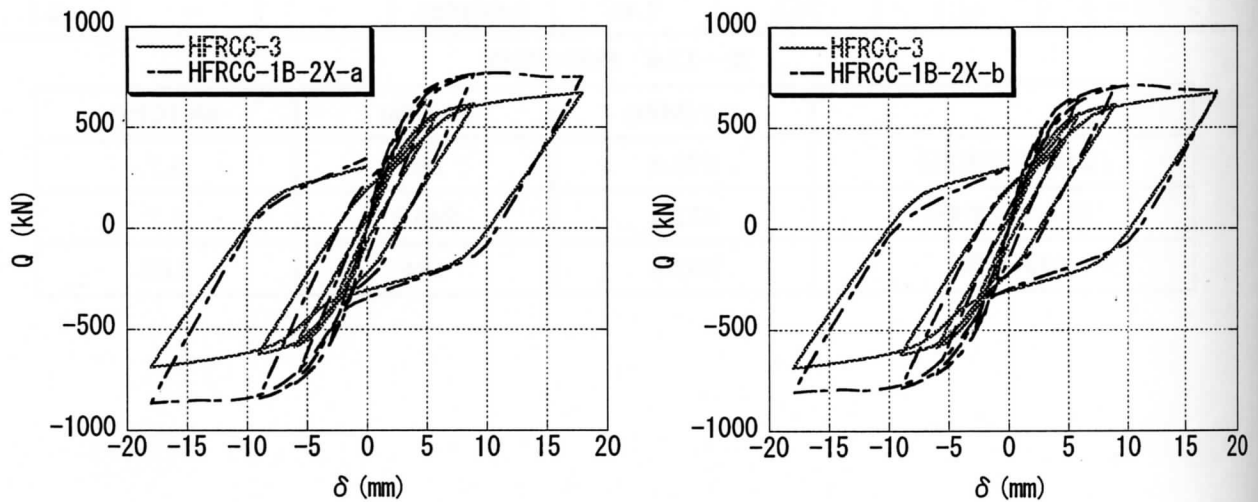


図-13.11 形状変化による履歴性状の変化

#### 13.3.4 形状に関する応用展開

ここで更に形状について変化を加え検討を行う。検討する試験体の形状及び配筋図を図-13.12 に示す。HFRCC-3 を比較の対象とし、断面形状の変化を無くし、ストレート形状とした HFRCC-3-a、更に HFRCC-3 の X 型配筋の傾斜角をそのままにし、部材中央部幅を 200mm としそれにあわせハンチ部の高さを 300mm に決定した HFRCC-3-b の 3 種類の試験体について比較検討を行う。解析条件については 13.2 の検討で決定した通りである。

解析によって得られた荷重-変位関係を図-13.13 に示す。剛性については、HFRCC-3 に比べ HFRCC-3-a の方が高く、HFRCC-3-b が低くなる結果となった。部材中央部の断面形状が小さくなるに従って、剛性が小さくなるのがこの結果から確認できる。耐力についても同様の傾向が確認できる。しかし载荷ピーク点に達した後の部材角 0 点での耐力がほぼ一致するのが確認できる。この傾向は 13.3.3 の検討でも確認できた傾向であり、X 型配筋の強度及び量によって決定すると思われる点である。この結果から、紡錘形に近い履歴性状が得られた試験体は中央部断面形状の一番小さい HFRCC-3-b である。部材断面形状が小さいとせん断破壊による耐力の低下の危険性が危惧され、また、これまでで検討したようにテンションスティフニング効果の程度なども異なることが考えられるが、今回の解析ではこの試験体が最も紡錘形に近い履歴性状を示した。

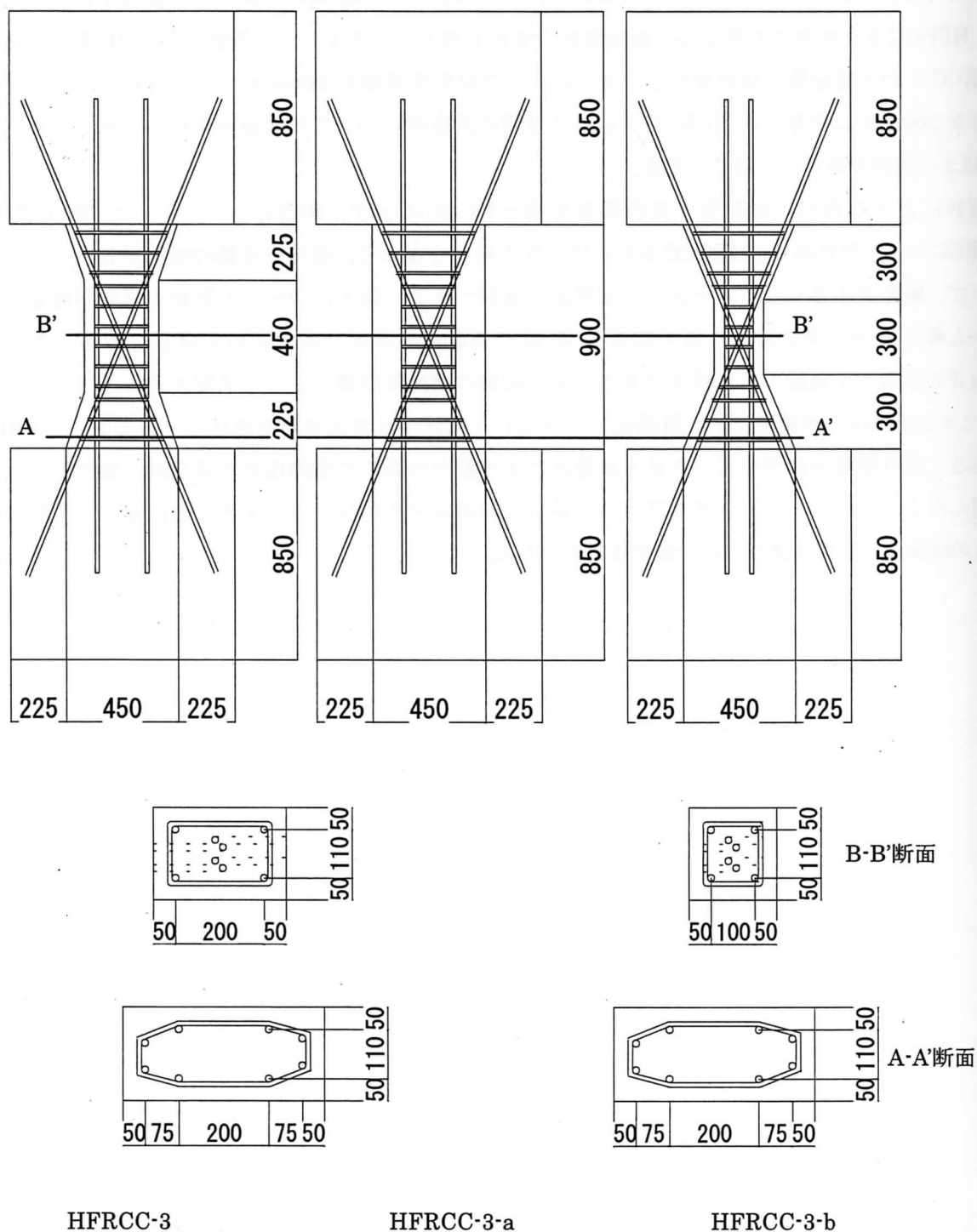


図-13.12 試験体形状及び配筋図



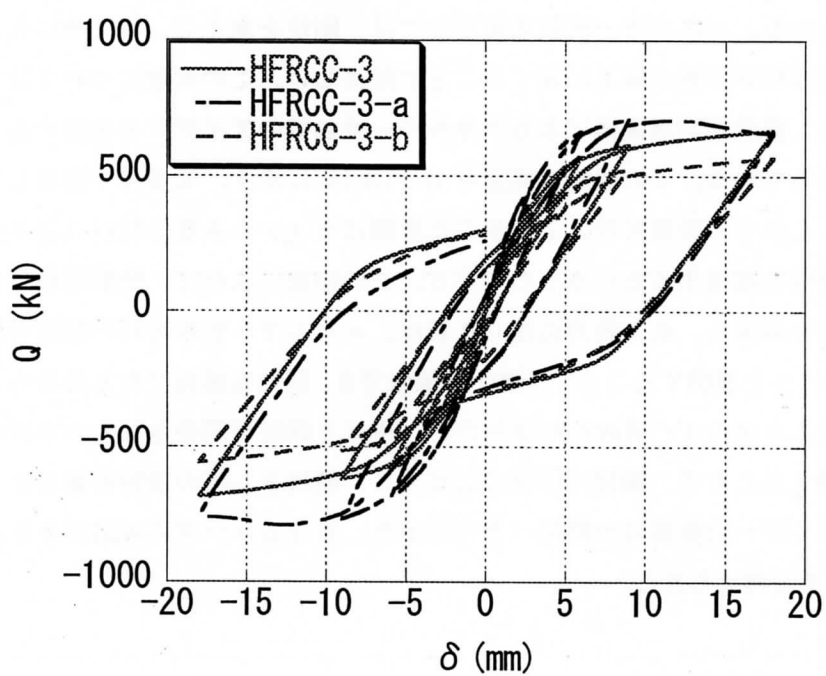


図-13.13 荷重-変位関係

### 13.3.5 剛性を確保するための応用展開

部材断面を部材中心に向かって減少させることで、X型配筋のテンションステイニング効果を効率よく得ることができ、履歴性状でもエネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴曲線を得られることから、より高性能なエネルギー吸収部材を開発できる可能性が確認できた。しかし、一番問題になるのが剛性の低さであると考えられる。エネルギー吸収部材としては、剛性を高くし、構造物に大きな変形が生じる前に、エネルギー吸収部材が最大耐力に達することが好ましい。この問題については、本研究と同時進行で研究されている、多段階破壊機構によるエネルギー吸収壁のアイデアを採用することで補うことができることが確認されている。その機構の概要を図-13.14に示す。本研究で提案したエネルギー吸収部材を並列配置し、これらの断面形状により生じた隙間にセメント系複合材料（以下充填材）を充填させることによって剛性を確保するというものである。この研究によれば、脆弱な材料を充填材として採用することで、剛性を確保し、最大耐力に達した後は、エネルギー吸収部材の靱性を発揮させるというものである。この壁材へと展開することで、剛性も確保でき、靱性も確保できる部材へと展開できる。また、本研究で検討したエネルギー吸収部材単体だと、やはり鋼材で開発されたエネルギー吸収部材には劣る。壁材へと展開することで、鋼材では達成しにくい、壁材としての役割を兼用するエネルギー吸収部材、大断面のエネルギー吸収部材の開発へとつながり、異なるニーズに対応できるエネルギー吸収部材の開発へとつながると考えられる。

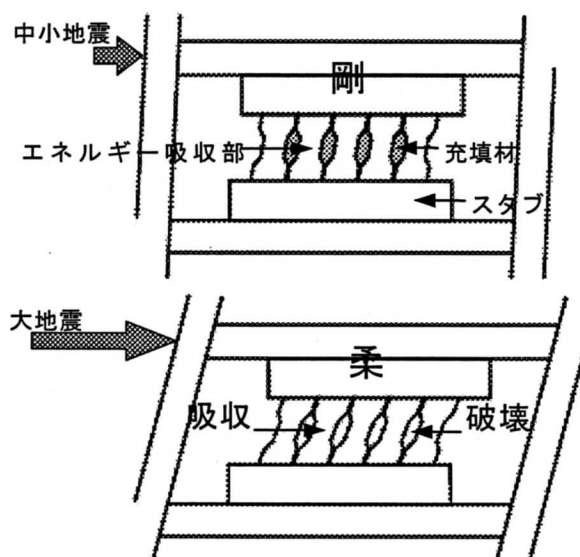


図-13.14 エネルギー吸収壁の概

## 第 14 章 結び

第Ⅲ部では、「高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の構造性能」と題して、よりエネルギー吸収性能に優れたエネルギー吸収部材の開発、HFRCC の効果的な利用方法の提案を目的として、数値解析、並びに実験を行うことにより、セメント系材料を用いたエネルギー吸収部材の構造性能の解明、またエネルギー吸収部材としての可能性を検討してきた。第Ⅲ部で得られた知見を以下に示す。

### 第 11 章

- ・モーメント分布を考慮した断面形状の変化が、ひび割れの分散、鉄筋の塑性領域の拡大、危険断面の損傷の低減に効果的であることを数値解析により確認した。

- ・HFRCC の圧縮強度、引張強度、破壊エネルギーのうちエネルギー吸収部材の履歴性状に最も大きな影響を及ぼすのは引張強度（ポストピークの耐力）であることを数値解析により確認した。

- ・繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の最大耐力を推定するには、断面解析においてコンクリートの引張強度を考慮した方が精度良く耐力を評価できることを確認した。

### 第 12 章

- ・ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いることで、普通コンクリートに見られるようなひび割れの局所化を抑制し、微細ひび割れが部材全体に分散して発生した。

- ・平行主筋を使用したエネルギー吸収部材は、大変形時にも耐力が低下せず優れた靱性能を示すものの、履歴性状はスリップ型であった。

- ・軸力を導入することにより、鉄筋の引き抜け、ひび割れの発生を抑制し、軸力を導入しない試験体に比べエネルギー吸収性能、等価粘性減衰定数が向上した。しかし履歴性状はスリップ型であった。

- ・X型配筋を使用し、更にモーメント分布を考慮して断面形状を変化させることにより、鉄筋の局所的な塑性化を防ぎ、塑性領域が拡大し、エネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴性状を示し、大変形時にも耐力の低下しない、優れた靱性能を示すことが確認できた。

- ・断面形状を変化させることで、鉄筋の塑性領域を拡大させることができるだけでなく、スタブ部の損傷を抑制させることができることを確認した。スタブ近傍、危険断面への損傷の集中はエネルギー吸収部材に変形を集中させる為に健全であることが望ましく、その点においても部材断面を変化させることが効果的であると考えられる。

### 第 13 章

- ・履歴曲線については、ひび割れモデルに固定ひび割れモデルを採用した方が、実験を精度良く評価できたが、部材の損傷及び軸変位を評価するには回転ひび割れモデルを採用したほうが、実験を比較的精度良く評価することができた。

- ・解析により実験を評価する為には、テンションスティフニング効果を考慮する必要がある。
- ・X型配筋と平行主筋ではテンションスティフニング効果の程度が異なり、また鉄筋のひずみ分布の違いでもまたことなる。
- ・履歴曲線における載荷ピーク点に達した後の水平変位 0 点での耐力はほぼ、X型配筋の強度及び量によって左右されることが確認できた。
- ・部材断面形状の変化は、テンションスティフニング効果を効率よく得ることができ、また、履歴曲線を紡錘形にするのに効果的であるのが確認できた。しかし、部材中央部の断面形状を小さくすると剛性が小さくなるという影響が発生する。

今後の展望としては、X型配筋のより効果的な利用方法について検討する必要がある。X型配筋を使用することで履歴曲線におけるスリップ性状を改善できることは確認できたが、最適な鉄筋量、最適な傾斜角など検討する要因はまだ多い。

また、本研究の実験で問題となった、危険断面への損傷をいかに軽減するかも検討する必要がある。本研究で提案した部材断面を変化させたエネルギー吸収部材により、達成できると考えられ、また断面形状の変化はX型配筋に発生するテンションスティフニング効果を顕著に得るためにも効果的であることは確認できたが、最適形状に達するまでにはまだまだ検討要因も多い。

材料の面においては、更にエネルギー吸収性能に優れたセメント系材料を用いたエネルギー吸収部材の開発のために、HFRCC のポストピークでの引張耐力を更に向上させることが必要になると考えられる。HFRCC の材料挙動として、圧縮挙動と引張挙動については明らかになってきているが、圧縮引張の繰り返し載荷挙動や、せん断挙動、せん断補強筋による拘束効果の評価など、未解明な点が多く存在する。それらの挙動を解明し、より妥当な材料構成則の確立が必要になってくる。

また、解析プログラムの発達はめまぐるしいものの、今だ実挙動を評価するには不完全な面も多い、特に、コンクリートの繰り返し挙動や、鉄筋の繰り返し挙動など、より実挙動に近い構成則のモデル化が必要である。

本研究では、HFRCC を用いたエネルギー吸収部材の構造性能について検討してきた。本研究においても、部材実験によりエネルギー吸収性能に優れた紡錘形の履歴曲線を得ることができたが、実用化に向けてはまだ問題も多い。地震国のわが国では、制震性能に優れた部材の開発が望まれ、セメント系材料によるエネルギー吸収部材は、安価で、適用性も高く、現代のニーズにあった部材であると考えられる。更に、首都部での建築物の高層化に伴い制震部材の適用は必須条件になってきているのも確かである。確かに鋼材の制震部材は優れているが、本論文でも紹介したエネルギー吸収壁としての応用展開、ピロティなど変動軸力の大きい場所で用いるための展開など、セメント系材料でしか達成できないエネルギー吸収部材も数多く存在するのも確かであり、TPO に応じた制震部材の選択範囲を広げるのも、エンジニアの使命である。これらのことを踏まえ、またこの研究を基礎としてよりエネルギー吸収性能に優れたエネルギー吸収部材の開発を期待する。

## 結論

---

## 第15章 結論

本研究では、多段階ハイブリッド型複合材料及び構造部材の開発を目的として、その基礎的な実験的検討並びに解析的検討を行った。

### 第Ⅰ部：

第1章から第4章では、材料開発の第一段階として二種類の補強材、つまり、高性能合成繊維に加えてスチールコードを使用したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料について、高強度・高靱性という2つの要求性能を満足し得る材料開発に関する実験的検討を行った。ハイブリッド型繊維補強を施すことにより、スチールコードのみを混入したときに見られた脆性的で大きなマトリックスのひび割れは減少して微細なひび割れが形成された。尚、スチールコード混入FRCCにおいて大きなひび割れが形成されつつも靱性的な曲げ挙動を示したことから、スチールコードはメゾレベルのひび割れに有効に働くことが確認できた。更に、合成繊維のみ及びスチールコードのみのFRCCと比較して曲げ強度・靱性ともに高い性能を示した。特に、ポリエチレン繊維とスチールコードとのハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料では、一軸引張応力下においても微細な複数ひび割れ及び1.5%程度までの疑似歪硬化を示し、HPRCCとして位置付けられるほどの高い性能を示した。Liらによって開発されたECCほどの大きな歪までの変形能は示さないものの強度は高く、構造用材料として多様な利用方法が期待される。

### 第Ⅱ部：

第5章から第9章では、多段階ハイブリッド型補強高靱性複合材の基礎的研究として、合成繊維、及びスチールコードを含むハイブリッド型複合材料（HFRCC）に埋設された鉄筋の両引き試験を行い、X線透過撮影により試験体内部のひび割れ状況を観察した。その結果、鉄筋の節々からコーン状の付着ひび割れが確認できた。これらの微細な複数ひび割れの発生は、普通のコンクリートを用いた場合よりもはるかに高いテンションスティフニング効果をもたらすと共に、鉄筋降伏後も優れた高靱性を発揮することを確認した。特に、マトリックスとしてHFRCCを使用した試験体ではほぼ全ての節から微細なひび割れが発生しており、多段階補強によるひび割れの微細化が実現できたと考えられる。両引き試験で得られた引張応力-歪関係からFRCCもしくはHFRCCが負担する引張応力をテンションスティフニング効果として算出したところ、HFRCCを使用した試験体ではFRCCを使用した試験体よりも高いテンションスティフニング効果が得られたことが確認できた。両引き試験におけるHFRCCの負担引張応力と円柱試験体で測定された直接引張応力を比較すると、両引き試験で得られた引張応力の方がより高い値を示した。これは鋼管コンクリートなどで指摘される「コンファインド効果」によるものと考えられた。更に、鉄筋の降伏点歪約0.2%付近において鉄筋の負担応力を過大評価しているものと考えられる。HFRCCは、その剛性保持能力とより小さい歪段階から十分な強度を発揮しながら、それらに加えて変形能力も十分に発揮できるという点で鉄筋や鉄骨と組み合わせて使用する構造材料としてはFRCCよりも更に優れているといえよう。

また、せん断力を受ける鉄筋コンクリート梁においても、FRCCあるいはHFRCCによる微細な複数ひび割れの発生は、梁のせん断破壊挙動を安定なものに変化できることを確認した。特にHFRCCはその材



料特性の影響で、最大荷重までの剛性が高くなり挙動が安定している点は、HFRCCの構造部材への適用を支持するものと評価できる。

### 第Ⅲ部：

第10章から第14章では、HFRCCを用いた新しい構造システムの開発を目的として、水平荷重を受けるエネルギー吸収部材の解析並びに実験的検討を行った。特に、部材の高さ方法に断面形状を変化させ、X型配筋を施した場合には、HFRCCの特徴の一つでもあるより高いテンションスティフニング効果をより効率良く発揮させることができることを明らかにした。

本研究は、21世紀の建築構造物や社会基盤構造に求められる要求性能の中から特に高強度・高靱性・高耐久性を実現できる材料の開発を目的に、ハイブリッド型高靱性セメント系複合材料の開発とそれを利用した新しい構造システム開発のための基礎的な検討を行った。限られた条件の中での研究であるために未だ多くの検討課題も残っているが、本研究で得られた成果は次の段階への発展につながるものと確信している。

## <謝辞>

本研究は、前述研究組織の欄に記載した研究分担者のみならず4名の研究協力者の協力を得て実施されたものであるが、それに加えて多くの方々にも御協力を戴きました。

筑波大学機能工学系 金久保利之博士には、埋込み鉄筋の両引き試験について、大変有益な御助言を戴きました。

国土交通省国土技術政策総合研究所 諏訪田晴彦氏には、円柱試験体の直接引張試験を始め、多大な御協力を戴きました。

X線透過撮影試験に際しては、東北学院大学工学部 武田三弘講師並びに大学院修士課程2年生の守聡志氏を始め、学生諸氏の御協力を頂戴しました。

構造部材実験に際しては、浅沼組技術研究所の全面的な御協力を戴きました。とりわけ、立松和彦氏ならびに山崎順二氏には材料調合関係について、また森浩二氏には構造実験関係について御協力を戴きました。

また、鹿島建設株式会社技術研究所 関田徹志博士には、高靱性セメント系複合材料の開発に関する様々な情報の御提供を戴きました。

更に、株式会社宇部三菱セメント研究所、東京製綱株式会社、株式会社クラレ、並びに東洋紡績株式会社の各社には試料の御提供を戴きました。

以上、ここに記してお世話になった方々に謝意を表します。